

**MOH**



**КНИГА-ПОБЕДИТЕЛЬ**  
конкурса рукописей учебников  
по направлениям  
подготовки в МЭИ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

# **ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ**

Учебник

Рекомендовано федеральным Учебно-методическим объединением  
в системе высшего образования по укрупненным группам  
специальностей и направлений подготовки  
13.00.00 «Электро- и теплоэнергетика» в качестве учебника  
для реализации основных образовательных программ  
высшего образования по направлению подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Москва  
Издательство МЭИ  
2023

УДК 621.36  
ББК 31.292-5  
Э 455

Подготовлено на кафедре электроснабжения  
промышленных предприятий и электротехнологий

Рецензенты: докт. техн. наук, проф., зав. каф. электроснабжения и электротехники  
Тверского государственного технического университета А.Н. Макаров;  
докт. техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных электротехноло-  
гических установок Новосибирского государственного технического  
университета А.И. Алиферов

**Авторы:** А.Б. Кувалдин, М.Я. Погребисский, М.А. Федин, С.М. Нехамин,  
М.М. Крутянский, А.Ю. Чурсин

Э 455 Электротехнологические установки и системы: учебник / А.Б. Кувалдин,  
М.Я. Погребисский, М.А. Федин и др. – М.: Издательство МЭИ, 2023. –  
640 с.

ISBN 978-5-7046-2858-3

Рассматриваются основы теории теплопередачи и методы решения задач теплообмена в электротехнологических установках. Приведены основные характеристики материалов, применяемых в электропечестроении. Рассмотрены принципы действия и конструкции электрических печей сопротивления, индукционных и дуговых печей и нагревательных установок, промышленных плазмотронов и плазменных печей, установок для ионно-плазменной обработки, а также электронно-лучевых и лазерных установок для обработки материалов. Рассмотрены схемы источников электропитания и структуры систем управления современных электротехнологических установок.

Учебник предназначен для ознакомления студентов с современными электротермическими и электротехнологическими процессами и установками.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

**УДК 621.36**  
**ББК 31.292-5**

ISBN 978-5-7046-2858-3

© Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», 2023

## *Сведения об авторах*

**Кувалдин Александр Борисович**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Национального исследовательского университета «МЭИ», заслуженный деятель науки РФ (гл. 3).

**Погребисский Михаил Яковлевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Национального исследовательского университета «МЭИ» (гл. 1, 2).

**Федин Максим Андреевич**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Национального исследовательского университета «МЭИ» (гл. 3).

**Нехамин Сергей Маркович**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Национального исследовательского университета «МЭИ» (гл. 4).

**Крутянский Михаил Миронович**, кандидат технических наук, главный технолог ООО «НПФ КОМТЕРМ» (гл. 4).

**Чурсин Андрей Юлианович** ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Национального исследовательского университета «МЭИ» (гл. 5 – 7).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	9
Глава 1 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	14
1.1. Теплопередача в электротехнологических установках.....	14
1.2. Специальные материалы, применяемые в электропечестроении.....	24
1.3. Типовые задачи по теплопередаче в электротехнологических установках.....	35
Контрольные вопросы.....	45
Список рекомендуемой литературы.....	46
Глава 2 ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЯ.....	47
2.1. Принцип действия, классификация и области применения.....	47
2.2. Типы и конструкции среднетемпературных печей сопротивления косвенного нагрева.....	50
2.3. Особенности конструкции низкотемпературных и высокотемпературных печей.....	58
2.4. Вакуумные электропечи сопротивления и печи с контролируемой атмосферой.....	63
2.5. Плавильные печи сопротивления, жидкостные ванны и печи с псевдокипящим слоем.....	69
2.6. Установки инфракрасного нагрева.....	74
2.7. Установки прямого нагрева.....	79
2.8. Тепловой расчет ЭПС периодического действия.....	83
2.9. Особенности теплового расчета ЭПС непрерывного действия.....	90
2.10. Расчет нагревательных элементов ЭПС.....	95
2.11. Электрооборудование ЭПС и автоматическое регулирование температурного режима ЭПС.....	103
2.12. Пути рациональной эксплуатации ЭПС, повышения энергетической эффективности.....	112
2.13. Типовые задачи расчета и проектирования ЭПС .....	116
Контрольные вопросы.....	128
Список рекомендуемой литературы.....	131

## Глава 3

УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА.....	132
3.1. История развития индукционного и диэлектрического нагрева....	132
3.2. Физические основы индукционного и диэлектрического нагрева.....	136
3.3. Классификация и области применения индукционного и диэлектрического нагрева.....	139
3.4. Индукционная электротехнологическая установка.....	143
3.5. Физические явления при индукционном нагреве.....	144
3.6. Основные характеристики индукционного нагрева.....	146
3.7. Расчет параметров электромагнитного поля.....	152
3.8. Электромагнитные силы при индукционном нагреве.....	180
3.9. Индукционные плавильные печи.....	184
3.10. Индукционные нагревательные установки различного назначения.	204
3.11. Установки диэлектрического нагрева.....	243
3.12. Электрооборудование индукционных печей и нагревательных установок промышленной и повышенной частоты.....	263
3.13. Системы управления индукционными печами и нагревательными установками.....	273
3.14. Типовые задачи, возникающие при расчете и проектировании установок индукционного нагрева.....	280
Контрольные вопросы.....	301
Список рекомендуемой литературы.....	305

## Глава 4

УСТАНОВКИ ДУГОВОГО НАГРЕВА И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА.....	307
4.1. Электрическая дуга. Распределения мощности в дуговых печах.....	307
4.2. Дуговые сталеплавильные печи (ДСП).....	358
4.3. Руднотермические печи (РТП) и процессы.....	384
4.4. Установки вакуумного дугового переплава (ВДП).....	397
4.5. Установки электрошлакового переплава (ЭШП).....	403
4.6. Дуговые и электрошлаковые печи как потребители электроэнергии и регулирование их режима.....	413
4.7. Электротехническое и энергетическое оборудование, электроснабжение ДСП, РТП,ВДП и ЭШП.....	435
4.8. Выбор рационального режима работы ДСП.....	451
4.9. Типовые задачи, возникающие при расчете и проектировании установок дугового нагрева и электрошлакового переплава.....	455
Контрольные вопросы и задания.....	464
Список рекомендуемой литературы.....	465

Глава 5	
ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ.....	468
5.1. Общие понятия нагрева плазмой при использовании электрической дуги.....	468
5.2. Некоторые схемы электродуговых плазмотронов и особенности дуги постоянного тока в канале с потоком газа.....	479
5.3. Электрические и тепловые характеристики электродуговых плазмотронов постоянного тока.....	488
5.4. Плазмотроны переменного тока.....	493
5.5. Пуск и питание электродугового плазмотрона.....	494
5.6. Условия формирования плазменного столба в плазмотроне.....	498
5.7. Модель плазменного генератора с ламинарной плазменной струей	504
5.8. Установки плазменной резки и сварки металлов.....	520
5.9. Установки утилизации твердых отходов.....	522
Контрольные вопросы.....	526
Список рекомендуемой литературы.....	526
Глава 6	
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ.....	528
6.1. Физические основы электронно-лучевой технологии, классификация и области применения электронно-лучевых технологических установок (ЭЛУ).....	528
6.2. Принципы формирования электронных пучков и управления их характеристиками. Конструкции электронных пушек.....	539
6.3. Примеры электронно-лучевых печей.....	567
6.4. Электрооборудование и системы управления ЭЛУ.....	577
Контрольные вопросы и задания.....	586
Список рекомендуемой литературы.....	587
Глава 7	
ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ (ЛАЗЕРЫ).....	588
7.1. Физические основы работы лазеров.....	588
7.2. Классификация лазеров и их некоторые характеристики.....	600
7.3. Лазерные комплексы.....	616
7.4. Практическое применение лазеров.....	619
7.5. Использование лазеров в промышленности.....	629
Контрольные вопросы и задания.....	639
Список рекомендуемой литературы.....	639

## ВВЕДЕНИЕ

В учебных планах ряда специальностей по направлению подготовки бакалавров предусмотрено изучение дисциплины «Электротехнология».

Термин «электротехнология» включает в себя два понятия: «электротехнологические процессы» и «электротехнологические установки».

**Электротехнологические процессы** – это процессы обработки материалов и изделий с использованием воздействия электрической энергии с целью достижения определенного технологического эффекта. В качестве примеров можно привести электроплавку металлов, нагрев различных материалов для изменения их структуры (закалка, отжиг и т.п.), получение неразъемных соединений деталей (сварка, пайка), проведение химических реакций (электролиз алюминия, связывание азота воздуха), сушка различных материалов и т.д.

Эти процессы реализуются в **электротехнологических установках**, в состав которых входят устройства для непосредственного воздействия на материал или изделия, системы электропитания, системы управления, дополнительное оборудование (системы водоохлаждения, оборудование вакуумное и для подачи газа, механизмы и приводы для перемещения обрабатываемого продукта и др.).

Обычно выделяют четыре группы электротехнологических процессов и установок:

- электротермические;
- электрофизические;
- электрохимические;
- электросварочные.

**Электротермические методы** обработки основаны на преобразовании электрической энергии в тепловую энергию (теплоту) для нагрева, плавки, испарения, снижения механической прочности и т.д.

**Электрофизические методы** используют нетепловое воздействие электроэнергии на изделие или материал. К ним относятся магнито-импульсная штамповка, ультразвуковая обработка, электроэрозионная обработка, разделение изотопов в магнитном поле и т.д.

**Электрохимические методы** обработки включают размерную обработку изделий, нанесение покрытий (гальваностегия), получение металлических изделий из раствора или расплава при помощи осаждения его (гальванопластику), а также **электролиз**.

**Электросварочные методы** получения неразъемного соединения изделий основаны как на тепловом, так и на других методах воздействия (например, сварка трением). Их выделяют в отдельную группу в связи со спецификой конструкции устройств и электротепловых расчетов и с учетом важности этих технологических процессов для производства.

В данном учебнике, предназначенном, главным образом, для подготовки специалистов (бакалавров) в области электротермии, рассматриваются вопросы разработки и эксплуатации электротермических установок и соответствующего вспомогательного оборудования с учетом технологических требований.

Традиционно электротермические установки (ЭТУ) подразделяются по способам преобразования электроэнергии в теплоту, основанным на различных физических принципах – виду электронагрева (рис. В.1).

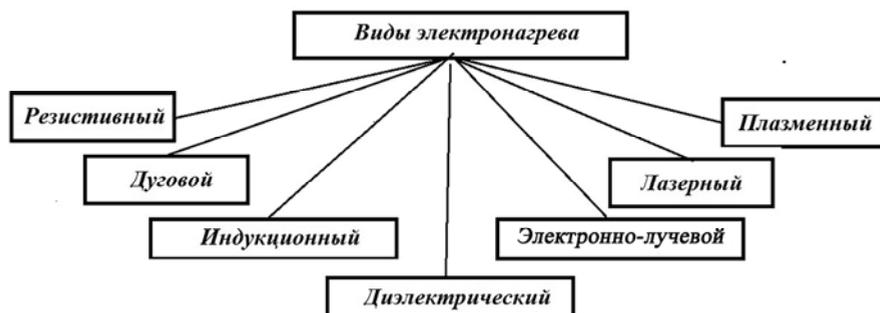


Рис. В.1. Виды электронагрева

**В установках резистивного нагрева (нагрева сопротивления)** преобразование электроэнергии в теплоту реализуется путем пропускания электрического тока промышленной частоты через нагреваемое изделие (прямой нагрев) или с использованием специальных нагревательных элементов (косвенный нагрев).

**В установках (печах) дугового нагрева** переменного или постоянного тока источником тепловой энергии является электрическая дуга, высокая температура которой позволяет плавить и испарять материалы.

**Установки (печи и устройства) индукционного нагрева** используют электромагнитное поле, создаваемое током индуктора (применяются различные частоты), для нагрева электропроводящих материалов и изделий за счет индуцированного тока.

**Установки диэлектрического нагрева** также создают электромагнитное поле (обычно высокой или сверхвысокой частоты), которое воздействует на связанные электрически заряженные частицы в непроводящем материале (диэлектрике), что приводит к его нагреву.

**В установках электронно-лучевого нагрева** генерируется пучок электронов (электронный луч), который нагревает обрабатываемое изделие и может быть сфокусирован для достижения больших значений плотности энергии, например, для плавки тугоплавких металлов.

**В установках плазменного нагрева (дуговых или индукционных)** за счет энергии электрической дуги или электромагнитного поля получают плазму, состоящую из нейтральных (молекулы и атомы) и заряженных (ионы и электроны) частиц, которая позволяет проводить высокотемпературные технологические процессы.

**Установки лазерного нагрева** используют пучок фотонов (лазерный луч), который может быть сконцентрирован на нагреваемой поверхности изделия для достижения весьма больших значений плотности энергии.

Следует отметить, что применяются и ЭТУ комбинированного нагрева, например, индукционно-плазменные, резистивно-дуговые, резистивно-индукционные, что позволяет в некоторых случаях улучшить энергетические и/или технологические показатели конкретного процесса.

Исторически резистивные, дуговые и индукционные ЭТУ стали применяться с конца XIX – начала XX вв., когда выросло производство электроэнергии и возникла потребность получения более качественных материалов и изделий. Установки диэлектрического нагрева появились в 30-х гг. (в основном, для процессов сушки и получения пластмасс, а установки электронно-лучевого, плазменного и лазерного нагрева – в 50 – 60-х гг. XX в. в связи с развитием полупроводниковой техники и производства спецсталей, титана и тугоплавких металлов, при котором необходимо использовать большие значения плотности энергии.

Создание и применение ЭТУ в промышленности вызвало потребность в инженерных кадрах данного профиля. В частности, подготовка инженеров-электротермистов в МЭИ началась в 30-х гг. XX в. (первый выпуск в 1938 г.). В 1943 г. была создана кафедра ЭТУ, а в 1948 г. издан учебник «Электрические промышленные печи» под общей редакцией заведующего кафедрой А.Д. Свенчанского, в котором излагался материал по тем четырем видам ЭТУ, которые применялись в промышленности в то время. Дальнейшее развитие и появление новых видов ЭТУ привело к значительному увеличению объема сведений и необходимости издания отдельных учебников по каждому виду нагрева с углубленным изложением материала. Однако для студентов непрофильных специальностей были выпущены два учебника: в 1961 г. – «Промышленные электротермические установки» (авторы: Н.М. Некрасова, Л.С. Кацевич, И.П. Евтюкова) и в 1982 г. – «**Электротехнологические промышленные установки**» (те же три автора и А.Д. Свенчанский), в которых вновь были представлены все виды ЭТУ, естественно, в несколько сокращенном изложении.

В связи с широким профилем подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» авторы на основании своего опыта преподавания в НИУ «МЭИ» и с учетом учебных программ курсов (дисциплин) сочли целесообразным подготовить учебник, в котором рассматриваются все основные виды электротермических установок в объеме, соответствующем учебному плану подготовки бакалавров.

Книга разбита на семь глав, соответствующих разделам курса «Электротехнология». В каждой главе в структурированной форме даются теоретические материалы и примеры решения некоторых прикладных задач, позволяющие студенту приобрести компетенции, необходимые для освоения раздела. Для оценки преподавателем знаний по каждому разделу разработаны контрольные вопросы.

Первая глава посвящена изучению элементов теории теплопередачи с акцентированием внимания на прикладных задачах, решение которых играет важную роль при проектировании электротехнологических процессов и установок. Так, в первой главе рассмотрены критерии и методы схематизации процессов теплопередачи, позволяющие решать задачи передачи тепла теплопроводностью через футеровку печей аналитическим путем. Дается методика расчета коэффициента конвективной теплопередачи, основанная на критериях подобия течений сред, и теория теплового излучения. Приводятся справочные данные по характеристикам теплоизоляционных, жароупорных и огнеупорных материалов, применяемых в электротермии.

Во второй главе рассматриваются электрические печи сопротивления и другие применяемые в промышленности установки резистивного нагрева. Дана классификация электрических печей сопротивления по различным признакам и рассмотрены их основные области применения. Приведены основные методы расчета печей сопротивления и выбора материалов нагревателей и футеровки. Описана специфика работы вакуумных печей и печей с контролируемой атмосферой.

Третья глава посвящена изучению процессов и оборудования для индукционного нагрева. Приводится классификация, принцип действия и области применения индукционного нагрева, т.е. нагрева проводников в электромагнитном поле. Рассматриваются физические основы и математическое описание процессов индукционного нагрева. Приводятся основные характеристики индукционного нагрева и расчеты параметров электромагнитных полей в проводниках и непроводящей среде при индукционном нагреве. Дана классификация установок индукционного нагрева, рассмотрены их основные области применения. В главе достаточно подробно рассматриваются индукционные плавильные печи, а также индукционные нагревательные установки для реализации различных технологических процессов. Рассмотрены вопросы организации систем электропитания и управления установок индукционного нагрева и плавки.

В четвертой главе рассмотрены актуальные вопросы физики электрической дуги. Дана классификация установок дугового нагрева, приведены их параметры и рассмотрены их основные области применения. Описана специфика работы дуговых сталеплавильных печей, вакуумных дуговых печей, руднотермических печей и установок электрошлакового переплава, их источников питания и технологического образования. Сформированы инженерные подходы к расчету основ-

ных параметров указанных типов печей и их энергетических характеристик, обеспечению эффективного распределения мощности в их рабочем пространстве. Рассмотрены вопросы электроснабжения установок дугового нагрева как наиболее крупных электропотребителей, использующих специальные технические решения для обеспечения их электромагнитной совместимости с питающими сетями.

В пятой главе рассмотрены современные технологии плазменной обработки материалов. Дана классификация плазменных процессов по температуре и плотности заряженных частиц, а также проведен обзор промышленных плазменных технологий, реализуемых на установках различного типа. Рассмотрены основные типы промышленных плазмотронов, применяемых в технологиях плавки, сварки, резки, осаждения покрытий и плазмохимических процессах. Описана методика расчета дуговых плазмотронов, основанная на критериях подобия.

Шестая глава посвящена изучению процессов электронно-лучевой обработки материалов, а также принципов действия и конструкций современного электронно-лучевого оборудования. Рассмотрены принципы генерации электронных пучков и методы расчета элементов конструкций электронных пушек.

Седьмая глава посвящена оптическим квантовым генераторам (лазерам).

Учебник подготовлен коллективом авторов – преподавателей и сотрудников НИУ «МЭИ» в составе: к.т.н., доцент Погребисский М.Я. (главы 1,2); д.т.н., профессор Кувалдин А.Б. и д.т.н., доцент Федин М.А. (глава 3); д.т.н. Нехамин С.М. и к.т.н. Крутянский М.М. (глава 4); инженер Чурсин А.Ю. (главы 5–7).

Учебник помимо своего основного потребителя – студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», может быть полезным студентам других специальностей, связанных с применением электротехнологических и электротермических установок, а также инженерно-техническим работникам, занятым эксплуатацией и разработкой соответствующего оборудования.

## ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1.1. Теплопередача в электротехнологических установках

Теплообменом или теплопередачей называется переход тепла из одной части пространства к другой. Необходимым условием теплопередачи является наличие разности температур отдельных тел или участков тел. Тепло передается от нагретого тела более холодному.

Явление теплопередачи может быть стационарным и нестационарным. При стационарном (установившемся) процессе температурное поле постоянно, т.е. температура отдельных точек рассматриваемого тела или пространства неизменна во времени, хотя возможны любые перепады температур между этими точками. При нестационарном (неустановившемся) процессе температура отдельных точек рассматриваемого пространства или тела меняется во времени.

Различают три вида теплопередачи – теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

**Тепло передается теплопроводностью внутри твердых, жидких или газообразных тел, а также от тела к телу при их непосредственном контакте.** Передача тепла теплопроводностью обусловлена тепловым движением и взаимодействием микрочастиц вещества.

Примерами передачи тепла теплопроводностью в электротехнологии могут служить передача тепла через стенку электрической печи (тепловые потери теплопроводностью), передача тепла от поверхности к центру изделия, нагреваемого в печи сопротивления.

Согласно **гипотезе Фурье**, количество теплоты, проходящее теплопроводностью через заданную поверхность слоя вещества за единицу времени, должно быть пропорционально разности температур на единице длины пути теплового потока, т.е. температурному градиенту. Исходя из этого, связь между **тепловым потоком** (количеством теплоты, проходящим через заданную поверхность слоя вещества за единицу времени) и температурным градиентом (уравнение Фурье) может быть записана в дифференциальной форме в следующем виде:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF dt, \quad (1.1)$$

где  $n$  – вектор, направленный по нормали к **изотермической поверхности** (поверхности, все точки которой имеют одинаковую температуру).

Количество теплоты, проходящее через элементарную площадку  $dF$  изотермической поверхности в единицу времени  $dt$ , зависит от физических свойств вещества, в котором происходит рассматриваемый процесс теплопередачи, и от температурного градиента.

**Коэффициент теплопроводности** (или просто теплопроводность)  $\lambda$ , Вт/(м·°С), в формуле (1.1) характеризует физические свойства среды, в которой протекает процесс теплопередачи. Знак «минус» берется в правой части потому, что тепловой поток всегда направлен от более высоких температур к более низким, т.е. обратно направлению температурного градиента.

Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности и единице времени, носит название **плотности теплового потока**. Он имеет размерность Вт/м<sup>2</sup>.

Чем плотнее материал, тем больше его способность проводить тепло (наибольшей теплопроводностью обладают твердые тела, теплопроводность жидкостей и газов значительно меньше). Самой высокой теплопроводностью характеризуются металлы и сплавы – от нескольких десятков Вт/(м·°С) до 410 Вт/(м·°С) (серебро). Теплопроводность строительных и теплоизоляционных материалов (диэлектриков) лежит в пределах 0,02–3,0 Вт/(м·°С). К теплоизоляционным относят материалы, теплопроводность которых не превышает 0,2 Вт/(м·°С). Воздух является хорошим теплоизолятором (его теплопроводность в нормальных условиях составляет 0,025 Вт/(м·°С)), поэтому с увеличением пористости материала теплопроводность снижается.

Одним из простейших случаев стационарной теплопроводности является теплопередача через бесконечную однородную плоскую стенку, на обеих поверхностях которой поддерживаются постоянные температуры. В такой стенке установится температурное поле, в котором изотермические поверхности представляют собой плоскости, параллельные боковым поверхностям стенки. В поле такого вида температура будет изменяться лишь по одному направлению, в направлении толщины стенки, по оси  $x$  (рис. 1.1а), в то время как по осям  $y$  и  $z$  она будет оставаться неизменной. *Отметим, что на практике бесконечной можно считать любую стенку, высота и ширина которой превышают толщину в 5 и более раз.*

Выражение для плотности теплового потока через бесконечную плоскую стенку, на поверхностях которой поддерживаются постоянные температуры  $t_{П1}$  и  $t_{П2}$ , получено интегрированием уравнения Фурье и записывается как

$$q = \frac{\lambda}{S}(t_{П1} - t_{П2}), \text{ Вт/м}^2. \quad (1.2)$$

Распределение температуры по толщине стенки:

$$t = t_{П1} - \frac{q}{\lambda}x. \quad (1.3)$$

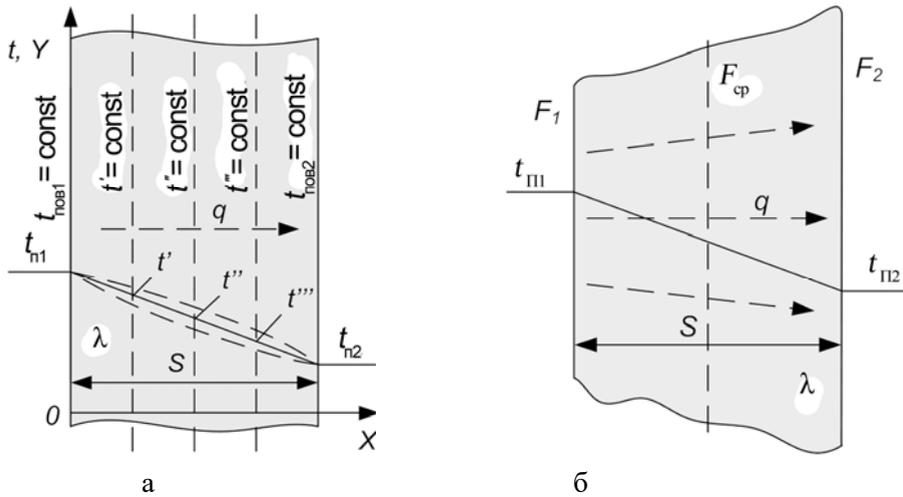


Рис. 1.1. Стационарная теплопроводность в бесконечной плоской стенке (а) и в плоской стенке конечных размеров (б)

Можно видеть, что распределение температуры представляет собой прямую линию (если не учитывать температурную зависимость  $\lambda$ ). На самом деле температурная кривая внутри плоской стенки несколько отличается от прямой, причем для материалов, у которых теплопроводность увеличивается с ростом температуры (огнеупоры, теплоизоляция), она будет направлена выпуклостью вверх, а для материалов, у которых теплопроводность с ростом температуры снижается (чистые металлы) – выпуклостью вниз (рис. 1.1а).

Переходя от плотности теплового потока к тепловому потоку  $P$ , проходящему через участок стенки конечной площадью  $F$ , получим:

$$P = \lambda \frac{t_{\text{П1}} - t_{\text{П2}}}{S} \cdot F, \text{ Вт.} \quad (1.4)$$

По формуле (1.4) могут рассчитываться, например, потери тепла в установившемся режиме через стенку электрической печи, на поверхностях которой измерены температуры  $t_{\text{П1}}$  и  $t_{\text{П2}}$ .

Если стенка (рис. 1.1б) имеет конечные размеры, тепловой поток через нее определяется по формуле (1.4), в которую вместо  $F$  подставляется расчетная (средняя) площадь  $F_{\text{ср}}$ .

$$F_{\text{ср}} = \frac{F_1 + F_2}{2}, \text{ когда отношение } F_2 / F_1 \leq 2, \text{ а также при цилиндрических}$$

стенках с отношением диаметров  $d_2 / d_1 \leq 2$ . В тех случаях, когда отношение  $F_2 / F_1 > 2$ , а также когда рассчитывается потери печи в целом, более точным будет использование среднего геометрического из значений площадей поверхностей, ограничивающих стенку:

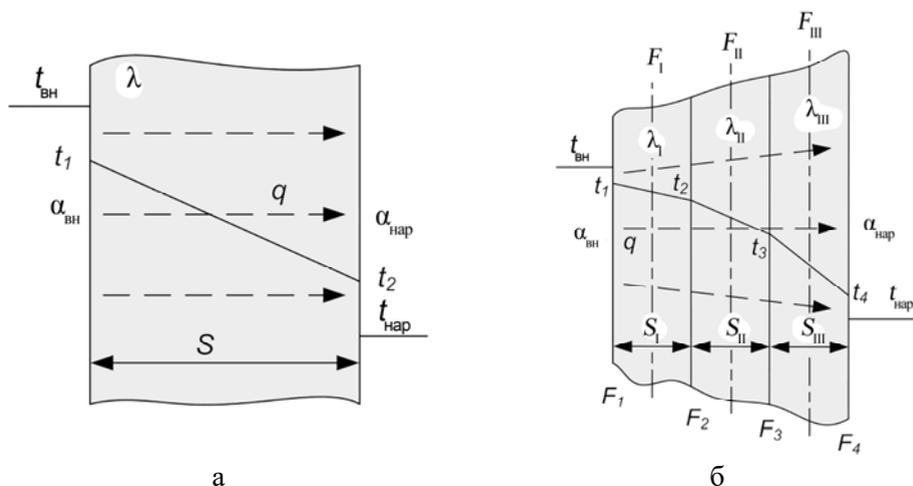
$$F_{\text{ср}} = \sqrt{F_1 \cdot F_2}.$$

Для расчета потерь через цилиндрическую стенку существует точное выражение [1], однако на практике потери через такую стенку с достаточной для инженерных расчетов точностью можно определять по формуле (1.4) для плоской стенки конечных размеров.

Рассмотрим теперь случай, когда известны температуры среды, омывающей обе поверхности стенки  $t_{\text{вн}}$  и  $t_{\text{нар}}$  (рис. 1.2), а также закон передачи тепла от среды к стенке и от стенки к среде, так называемые граничные условия третьего рода. Это наиболее распространенный случай при проектировании печей. Теплообмен стенки с окружающей средой осуществляется конвекцией или излучением, простейшее выражение для плотности теплового потока при этом (закон Ньютона) записывается как

$$q = \alpha \Delta t, \quad (1.5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией (или излучением), Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\Delta t$  – разность температур среды и поверхности стенки.



**Рис. 1.2. Стационарная теплопроводность через однослойную (а) и многослойную (б) плоские стенки с учетом конвективного теплообмена поверхностей с окружающей средой**

Таким образом, для внутренней и наружной поверхностей стенки задаются значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{вн}}$  и  $\alpha_{\text{нар}}$  соответственно.

Потери тепла (тепловой поток) через однослойную стенку с учетом конвективного теплообмена поверхностей с окружающей средой определяются как

$$P = \frac{(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) F_{\text{ср}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}}, \text{ Вт.} \quad (1.6)$$

Можно заметить, что выражение (1.6) представляет собой аналог закона Ома, в котором тепловой поток является аналогом тока, а разность температур – аналогом разности потенциалов (напряжения). Знаменатель в выражении (1.6) представляет собой сумму **тепловых сопротивлений**, в данном случае речь идет о двух тепловых сопротивлениях конвекции и тепловом сопротивлении теплопроводности.

Температуры поверхностей стенки  $t_1$  и  $t_2$  могут быть определены как

$$t_1 = t_{\text{вн}} - \frac{P}{\alpha_{\text{вн}} F_{\text{сп}}}; \quad t_2 = t_{\text{нар}} + \frac{P}{\alpha_{\text{нар}} F_{\text{сп}}}. \quad (1.7)$$

Для многослойной стенки конечных размеров, например, трёхслойной (рис. 1.2б), потери тепла аналогично определяются как

$$P = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} F_1} + \frac{S_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{S_2}{\lambda_2 F_2} + \frac{S_3}{\lambda_3 F_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} F_4}}, \text{ Вт}, \quad (1.8)$$

где  $F_1, F_2, F_3$  – средние расчетные поверхности слоёв I, II, III соответственно. Пограничные температуры могут быть определены как

$$t_1 = t_{\text{вн}} - \frac{P}{\alpha_{\text{вн}} F_1}; \quad t_2 = t_1 - \frac{PS_1}{\lambda_1 F_1};$$

$$t_4 = t_{\text{нар}} + \frac{P}{\alpha_{\text{нар}} F_4}; \quad t_3 = t_4 + \frac{PS_3}{\lambda_3 F_3}.$$

При определении тепловых потерь через стены печей формулами (1.2) и (1.4) можно пользоваться для работающих печей, когда температуры на их поверхностях могут быть замерены, формулы (1.6) и (1.8) могут быть использованы при расчетах тепловых потерь проектируемых печей.

*Температурное поле (зависимость температуры от пространственных координат  $x, y, z$  и от времени  $\tau$ ) в твердом теле при нестационарной теплопроводности определяется дифференциальным уравнением теплопроводности (уравнением Кирхгофа – Фурье)*

$$a \nabla^2 t = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1.10)$$

где  $\nabla^2 t$  – лапласиан, в декартовых координатах равный сумме вторых производных от температуры по пространственным координатам;  $a$  – **коэффициент теплоупроводности** материала, определяемый как

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (1.11)$$

где  $\lambda, c, \gamma$  – теплофизические параметры материала (соответственно теплопроводность, Вт/(м·°С), удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С), плотность, кг/м<sup>3</sup>).

Если внутри тела выделяется тепло (имеются **внутренние источники теплоты**), как, например, при индукционном, диэлектрическом нагреве, прямом нагреве сопротивления, в левой части уравнения Кирхгофа – Фурье дополнительно учитывается тепловыделение внутренних источников теплоты

$$a\nabla^2 t + \frac{1}{c\gamma} w(x, y, z) = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1.12)$$

где  $w$  – удельная объемная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м<sup>3</sup>, в общем случае зависящая от пространственных координат  $x, y, z$ .

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет аналитическое решение только для ряда простых частных случаев, среди которых можно назвать нагрев плоской бесконечной плиты и сплошного цилиндра бесконечной длины при постоянной температуре печи (среды) или при постоянном тепловом потоке через поверхность. Такие решения приведены в специальной литературе [1, 2]. При определенных допущениях этими решениями можно пользоваться при расчете режима нагрева многих реальных изделий [3]. В более сложных случаях применяется математическое численное моделирование процессов нагрева [3].

Необходимым условием **конвективной теплопередачи** является наличие жидкой или газовой среды. Этот вид теплопередачи обусловлен движением макроскопических частей жидкой или газообразной среды. Различают конвекцию **естественную** (перемещение частиц вызвано тем, что холодная и горячая среда имеет разную плотность) и **вынужденную** (движение среды обусловлено внешними причинами, например, использованием вентиляторов или перемешиванием жидкости). Теплообмен между стенкой и омывающей ее жидкостью или газом называется конвективным теплообменом.

В электротехнологических установках конвективная теплопередача играет существенную роль, особенно при низких температурах, в теплоотдаче наружных поверхностей стен печи окружающему воздуху, а также и в теплопередаче внутри печи от раскаленных стен и нагревателей к нагреваемым изделиям. Почти во всех этих случаях теплопередача будет осуществляться и конвекцией, и излучением, поэтому раздельное их изучение затруднено. Так как при высоких температурах роль конвекции мала, конвекцию необходимо учитывать лишь в низкотемпературных (до 700°C) печах и в печах с принудительной циркуляцией атмосферы. В таких печах конвективная теплопередача преобладает.

При расчете теплопередачи конвекцией обычно пользуются весьма простым выражением, называемым законом Ньютона

$$P = \alpha_k (t_{ст} - t_{ср}) F_{ст}, \text{ Вт}, \quad (1.13)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от стенки к жидкой или газовой среде (или наоборот), Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_{ст}$  и  $t_{ср}$  – температуры стенки и среды, °C;  $F_{ст}$  – поверхность омываемой средой стенки, м<sup>2</sup>.

Однако простота формулы (1.13) кажущаяся, так как величина коэффициента теплоотдачи конвекцией, в свою очередь, зависит от множества факторов: от температур стенки и омывающей ее среды, от скорости движения последней, ее теплопроводности, вязкости, плотности и теплоемкости, от конфигурации и состояния поверхности стенки и ее геометрических размеров и т.д. Поэтому изучение конвективного теплообмена осуществлялось главным образом экспериментальным путем.

Результаты экспериментальных исследований конвективного теплообмена обобщены в виде **критериальных уравнений**, представляющих собой связь между безразмерными комплексами – критериями подобия. Условия теплопередачи между твердым телом и средой характеризует критерий Нуссельта Nu, он содержит в себе искомую величину – коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , теплопроводность среды  $\lambda$  и определяющий размер  $L$

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda L}. \quad (1.14)$$

Условия вынужденного движения среды характеризует **критерий Рейнольдса**, содержащий в себе скорость потока  $w$ , м/с, и кинематическую вязкость среды  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с

$$Re = \frac{wL}{\nu}. \quad (1.15)$$

Свойства среды характеризует **критерий Прандтля**, представляющий собой соотношение кинематической вязкости  $\nu$  и температуропроводности  $a$  среды

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (1.16)$$

Естественное конвективное движение среды характеризует **критерий Грасгофа**

$$Gr = \beta \frac{gL^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (1.17)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta t$  – температурный перепад между средой и омываемой ею поверхностью, °С;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения (функция, связывающая изменение плотности среды с температурой), К<sup>-1</sup>.

В общем случае критерий Нуссельта является функцией критериев Грасгофа, Рейнольдса и Прандтля, при вынужденной конвекции в случае развитого турбулентного течения ( $Re > 10\,000$ ) не учитывается критерий Грасгофа, при естественной конвекции не учитывается критерий Рейнольдса.

Необходимо отметить, что значение критерия Рейнольдса  $Re = 10\,000$  является нижней границей режима развитого турбулентного течения только для идеальных условий, в реальности же в электротермических установках имеются так называемые искусственные турбулизаторы (шероховатости поверхности,

сужения и повороты канала, по которому протекает жидкость или газ, решетки и т.п.), поэтому развитое турбулентное течение имеет место и при меньших значениях критерия Рейнольдса.

Приведем ряд примеров критериальных уравнений конвективного теплообмена.

Естественная конвективная теплоотдача вертикально расположенной стенки

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (1.18)$$

где значения коэффициента  $C$  и показателя степени  $n$  зависят от произведения  $Gr \cdot Pr$  [1]. В качестве определяющего размера  $L$ , входящего в критерии, принимается высота стенки.

Вынужденный конвективный теплообмен в трубе круглого сечения в ламинарном режиме ( $Re < 2400$ )

$$Nu = 0,74 Re^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1} Pr^{0,2}, \quad (1.19)$$

определяющий размер – диаметр трубы.

То же в турбулентном режиме

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (1.20)$$

Вынужденная конвекция при поперечном обтекании цилиндра (например, трубчатого электронагревателя (ТЭН)) в турбулентном режиме ( $Re > 5000$ )

$$Nu = 0,226 Re^{0,6} Pr^{0,4}, \quad (1.21)$$

определяющий размер – диаметр цилиндра.

По критериальным уравнениям определяется значение критерия Нуссельта  $Nu$ , откуда легко получить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

**Теплопередача излучением преобладает в средне- и высокотемпературных печах, а также в вакуумных печах независимо от температуры.** Теплопередача излучением связана с двойным преобразованием энергии: тепловая энергия преобразуется в энергию электромагнитного излучения, а при достижении электромагнитной волной поверхности другого тела происходит обратное преобразование в тепловую энергию. Теплопередача излучением осуществляется в видимом (0,4–0,8 мкм) и инфракрасном (0,8–800 мкм) диапазонах длин волн.

Основные законы теплового излучения сформулированы для **абсолютно черного тела**, т.е. идеального тела, которое поглощает 100% энергии теплового излучения, достигшей его поверхности.

**Закон Планка** показывает зависимость спектральной плотности излучения абсолютно черного тела от длины волны излучения (**спектр излучения**) при различных температурах. **Под спектральной плотностью излучения  $E_{S\lambda}$  понимается отношение плотности теплового потока излучения (поверхностной плотности излучения), взятого в бесконечно малом интервале длин волн, включающем данную длину волны, к этому интервалу:**

$$E_{\lambda} = dq/d\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}). \quad (1.22)$$

Соответственно, плотность теплового потока интегрального излучения (суммарная во всем диапазоне длин волн) получается интегрированием спектральной плотности излучения по длине волны:

$$q = \int_0^{\infty} E_{\lambda} \cdot d\lambda. \quad (1.23)$$

Выражение закона Планка имеет вид:

$$E_{S\lambda} = 3,74 \cdot 10^{-10} \cdot \lambda^{-5} / [e^{0,0144/(\lambda \cdot T)} - 1], \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}), \quad (1.24)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $T$  – абсолютная температура, К. Индекс “S” при  $E_{\lambda}$  показывает, что речь идет об излучении абсолютно черного тела.

Графически закон Планка представлен на рис. 1.3. Из этого рисунка можно заметить, что при увеличении температуры максимум интенсивности (спектральной плотности) излучения смещается в сторону более коротких волн. Этот вывод уточняется **законом Вина (законом смещения): для абсолютно черного тела произведение длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности излучения, на абсолютную температуру есть величина постоянная:**

$$\lambda_{\max} T = \text{const} = B = 2900 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \quad (1.25)$$

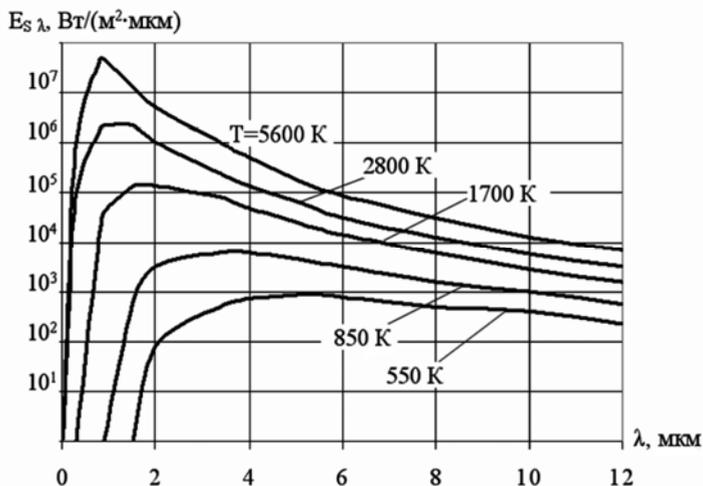


Рис. 1.3. Закон Планка

Согласно **закону Стефана – Больцмана**, плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной (в Кельвинах) температуры

$$q_s = 5,67 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (1.26)$$

Абсолютно черное тело (АЧТ) излучает энергии больше, чем любое другое тело при той же температуре. Плотность теплового потока излучения реального (серого) тела связана с плотностью теплового потока излучения АЧТ  $q_s$  соотношением

$$q = \varepsilon q_s = 5,67\varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (1.27)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты серого тела (коэффициент, характеризующий оптические свойства поверхности). Степень черноты выше у шероховатых поверхностей, ниже у блестящих, полированных. Наибольшей степенью черноты (более 0,98) обладают поверхности, покрытые сажей, у огнеупорного кирпича степень черноты составляет 0,8–0,9, у стали – около 0,8, у полированного алюминия – менее 0,2. *Окраска наружных поверхностей электротермического оборудования алюминиевой краской позволяет уменьшить теплоотдачу излучением от кожуха, т.е. несколько снизить тепловые потери.*

Количество теплоты, передаваемое излучением в единицу времени телом 1 телу 2, определяется как

$$P = 5,67\varepsilon_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1, \text{ Вт}, \quad (1.28)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты, зависящая от степеней черноты тел, их формы, размеров и взаимного расположения.

Нахождение приведенной степени черноты представляет собой сложную задачу и в общем случае осуществляется только численными методами. Однако для ряда частных случаев существуют простые аналитические решения. Например, для двух плоскопараллельных поверхностей степенью черноты  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (1.29)$$

Для случая теплообмена излучением двух концентрических тел, меньшее из которых (площадью поверхности  $F_1$ ) находится в полости большего (площадью поверхности  $F_2$ )

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}. \quad (1.30)$$

Примером такого расположения тел может являться нахождение нагреваемого изделия в камере печи сопротивления.

При необходимости учета как конвекции, так и излучения (так называемая **сложная теплопередача**) удобно выразить плотность суммарного теплового потока по закону Ньютона

$$q = \alpha(t_1 - t_2),$$

где  $t_1, t_2$  – температуры тел, участвующих в теплообмене, например, стенки печи и нагреваемого изделия;  $\alpha$  – общий коэффициент теплоотдачи, равный сумме коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{и}.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  определяется, как показано выше. Коэффициент теплоотдачи излучением может быть определен как

$$\alpha_{и} = \frac{q_{и}}{T_1 - T_2} = \frac{5,67\varepsilon_{пр} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}). \quad (1.31)$$

Вместо ф. (1.31) в инженерных расчетах часто используют приближенную формулу, применимую к нагреву изделия в печи сопротивления при температуре печи (в Кельвинах)  $T_{п}$ :

$$\alpha_{и} = 0,17\varepsilon_{пр}(T_{п}/100)^3, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}). \quad (1.32)$$

Под *температурой печи*  $T_{п}$  в случае печи с теплообменом преимущественно излучением понимаем температуру, измеряемую датчиком обратной связи системы регулирования температуры и поддерживаемую регулятором на заданном уровне. Фактически  $T_{п}$  близка к температуре внутренней поверхности футеровки. Как правило, заданное значение температуры печи принимают на 30–50 °С выше конечной температуры нагрева изделия. В печах с преимущественно конвективным теплообменом роль температуры печи играет температура газового потока на входе в загрузку.

Учитывая, что в средне- и высокотемпературных печах без принудительной циркуляции атмосферы коэффициент теплоотдачи конвекцией сравнительно мал, можно принять его усредненное значение равным 10 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), и тогда суммарный коэффициент теплоотдачи будет равен

$$\alpha = \alpha_{и} + \alpha_k = 0,17\varepsilon_{пр}(T_{п}/100)^3 + 10, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}). \quad (1.33)$$

## 1.2. Специальные материалы, применяемые в электропечестроении

Помимо обычных конструкционных материалов, употребляемых в машиностроении и электротехнической промышленности (таких, как конструкционные стали, медь, графит и др.), в конструкциях электротермических установок применяется ряд специфических материалов, предназначенных для работы

в условиях повышенных или высоких температур. Высокие температуры в электротермических установках требуют, с одной стороны, использования материалов, способных длительно работать при таких температурах, с другой – материалов, изолирующих в тепловом отношении зоны с высокими температурами от остальных частей печи и окружающего пространства.

К специфическим материалам для электротермических установок относятся: футеровочные (огнеупорные и теплоизоляционные) материалы, жароупорные конструкционные материалы и материалы для нагревательных элементов электропечей сопротивления (ЭПС).

Для изготовления внутренних деталей электротермических установок (печей), подвергающихся значительным механическим воздействиям, применяются **жароупорные конструкционные материалы**, которые характеризуются *малой скоростью окисления при высоких температурах* (это свойство называется **жаростойкостью**) и *сохраняют при таких температурах значительную механическую прочность (жаропрочность)*. Специфические жароупорные материалы обязательны к применению при температурах свыше 600°C, применение некоторых относительно недорогих сортов жароупорных сталей (12X13, 15X13Л) оправдано уже начиная с 450°C. При меньших температурах в печах могут применяться обычные конструкционные стали.

Жароупорные материалы используются для изготовления таких деталей печей, как подовые плиты, экраны, муфели, крепления нагревателей, детали транспортирующих устройств, служащих для перемещения в печи нагреваемых изделий (конвейерные ленты, ролики и т.п.), крыльчатки печных вентиляторов и многие другие. Также из жароупорных материалов изготавливается тара, загружаемая в печь вместе с изделиями (поддоны, ящики, контейнеры и т.п.).

В наибольшей степени требованиям к жароупорным материалам соответствуют жаропрочные и жаростойкие легированные стали и сплавы. Для изготовления незначительно механически нагруженных конструкций используются *хромистые стали и сплавы*, для конструкций, нагруженных значительно – *хромоникелевые*.

Для ненагруженных деталей при температурах до 700°C применяются стали, содержащие до 14% хрома (12X13, 15X13Л), при температурах до 1000°C – стали с 23–30% хрома (15X25Т и др.). Для нагруженных деталей при температурах до 850°C с успехом применяются хромоникелевые стали с содержанием хрома около 18% и никеля 8–10% (12X18Н10Т, 12X18Н9ТЛ). Из высоколегированных хромоникелевых сталей в электропечах наиболее часто применяются стали 20X23Н18 с рабочей температурой до 1000°C, 20X25Н20С2 (до 1100°C). Стали, предназначенные для изготовления литых деталей, отличаются индексом «Л» в обозначении марки: сталь 40X24Н12СЛ используется до 1000°C, 20X25Н19С2Л – до 1100°C. В наиболее ответственных конструкциях при температурах до 1200°C применяются более дорогие сплавы с участием алюминия или вольфрама – ХН45Ю, ХН70Ю, литейный Х28Н48В5Л.

*Следует помнить, что не все жароупорные материалы, хорошо работающие в печах с воздушной средой, пригодны для работы в вакууме или в науглероживающей среде (эндогазе, метане). Рекомендации по выбору конструкционных материалов для эксплуатации в таких средах даны в специальной литературе [4].*

Повысить рабочую температуру жароупорных материалов либо существенно продлить срок их службы позволяет нанесение различных жаростойких покрытий – алитирование (насыщение поверхностного слоя алюминием), хромирование, силицирование, цинкование.

*Следует помнить, что при температурах свыше 1200°C, а для нагруженных деталей – свыше 1150°C применение жароупорных материалов невозможно, поэтому при таких температурах в рабочем пространстве печи не должно быть жароупорных деталей, за исключением нагревателей (в случае, если температура на нагревателе не превышает предельную для используемого материала), а подовые плиты, поддоны, крючки для подвешивания нагревателей и т.п. должны выполняться из неметаллических материалов, а в случае вакуумных печей – из тугоплавких металлов или углеродных материалов.*

В печах с рабочей температурой 1000–1350°C для подовых плит применяется материал на основе карбида кремния (карборунда) карбофракс. В вакуумных печах и в печах с чистой защитной атмосферой (аргон) при температурах свыше 1200°C для экранной теплоизоляции и крепежных деталей используют тугоплавкие металлы (молибден, а при более высокой температуре – вольфрам) или углеродные материалы, включая углерод-углеродные композиты.

Рабочее пространство печи (камера для нагрева или плавления обрабатываемых в печи материалов), как область с наиболее высокой температурой, должна быть отделена от окружающего пространства и внешних конструкций каким-либо материалом, способным работать при температурах, которые достигаются в печи, и достаточно прочным, чтобы выдерживать механические нагрузки и термоудары (термические напряжения, возникающие при резком изменении температуры), которым он подвергается. Кроме того, этот материал должен плохо проводить тепло, снижая до минимума потери тепла из рабочего пространства в окружающую среду. Материалы, которые в достаточной степени удовлетворяли бы всем этим требованиям, на сегодняшний день не разработаны. Плотные, механически прочные керамические материалы способны работать при достаточно высоких температурах, но сравнительно хорошо проводят тепло, пористые легкие, плохо проводящие тепло материалы недостаточно прочны. Поэтому футеровку (стены, под и свод) печей на рабочую температуру свыше 700°C выполняют минимум из двух слоев: внутреннего **огнеупорного** и наружного **теплоизоляционного**. *Огнеупорный слой должен выдерживать рабочую температуру печи и обладать достаточной механической прочностью: этот слой играет роль силового элемента конструкции и воспринимает все нагрузки от нагреваемых изделий и нагревателей. Теплоизоляционный слой несет только собственный вес, зато обеспечивает снижение до минимума тепловых потерь.*

Наибольшее распространение в электропечах сопротивления и индукционных плавильных печах получили алюмосиликатные огнеупоры, представляющие собой систему окислов  $Al_2O_3 - SiO_2$  с различным соотношением основных компонентов, в дуговых сталеплавильных печах – огнеупоры на основе кремнезема  $SiO_2$  и окиси магния  $MgO$ .

По форме и размерам огнеупорные изделия подразделяются на: прямые кирпичи нормальных размеров  $230 \times 114 \times 65$  мм или  $230 \times 115 \times 75$  мм; уменьшенные прямые кирпичи; клиновые кирпичи; фасонные изделия различной конфигурации; рулонные и листовые материалы; мелкоштучные изделия разного назначения (например, крючки для подвешивания нагревателей, чехлы термопар); блочные изделия. Огнеупорные материалы используются также в виде набивных масс и обмазок.

Среди алюмосиликатных огнеупоров хорошо известны **шамотные огнеупоры**, содержащие от 28 до 45% глинозема  $Al_2O_3$ . Они подразделяются на плотные (марок ША, ШБ) и легковесные (ШЛ). Шамотные огнеупоры могут применяться до температур  $1350-1400^\circ C$ .

Большими рабочими температурами (в ряде случаев до  $1850^\circ C$ ) и высокой механической прочностью характеризуются изделия, изготовленные из материалов с высоким содержанием глинозема. К таковым относятся силлиманитовые изделия, изделия из плавленого муллита, алундовые и корундовые изделия. Такие изделия дороги.

**Динасовые огнеупоры** содержат не менее 93% кремнезема  $SiO_2$ . В основном они применяются в коксовых и стекловаренных печах, при устройстве сводов дуговых сталеплавильных печей, также из них складывается футеровка ванн дуговых сталеплавильных печей (ДСП), работающих по так называемому «кислородному процессу».

Футеровка ванн ДСП полного металлургического цикла варки стали (так называемого «основного процесса») изготавливается из **магнезитового огнеупора** (на основе  $MgO$ ).

В некоторых случаях (особенно при температурах порядка  $2000^\circ C$  и выше) в качестве огнеупорных применяются изделия из углеродных материалов – графита, углеродных композитных материалов. Однако из-за склонности к окислению приемлемый срок их службы достигается только в вакууме или защитной среде.

В печах с особо высокими температурами применяются огнеупорные изделия из окислов редких металлов (тория, бериллия), а также нитридов бора и титана, тугоплавких карбидов (карбидов бора, хрома, ванадия, вольфрама, молибдена, ниобия).

Следует отметить, что огнеупорная кладка выполняется с заполнением швов между кирпичами специальными связующими огнеупорными растворами – **мертелями**.

В плавильных печах и печах с жидкой средой (жидкостных ваннах) широко применяются футеровки из **набивных масс**. Набивные массы представляют собой смесь огнеупорного порошка со связующим – эпоксидной смолой, жидким стеклом, борной кислотой и т.п.

Как уже отмечено, наиболее широко в электротермических установках применяются алюмосиликатные огнеупоры, в частности, шамотные. Однако шамотные изделия во многих случаях (особенно для печей, работающих при температурах до 1000°C) обладают избыточной огнеупорностью и механической прочностью и в то же время имеют чрезмерно высокую плотность (следовательно, аккумулируют много тепла) и слишком большую теплопроводность. Поэтому широкое распространение получили искусственные материалы на основе шамота, обладающие повышенной пористостью. Они характеризуются меньшей теплопроводностью и меньшей средней плотностью за счет некоторого снижения механической прочности. Такие материалы носят название **легковесов** или **пористых огнеупоров**.

Средняя плотность шамотных легковесов составляет от 0,27 до 1,3 г/см<sup>3</sup> (этой величине соответствует числовое обозначение в марке огнеупора, например, ШЛ-1,3 или ШЛ-0,8).

Еще меньшими плотностью и теплопроводностью обладают **волокнистые огнеупорные материалы** на основе муллитокремнеземистого волокна. Изделия из таких материалов производятся в виде ваты, рулонного войлока, плит, бумаги, картона.

Основные свойства важнейших огнеупорных материалов представлены в табл. 1.1.

**Теплоизоляционные материалы** применяются в качестве наружных слоев в футеровках электрических печей различного назначения. К ним предъявляется ряд специфических требований: малые теплопроводность, плотность, теплоемкость, малая стоимость, удовлетворительная механическая и химическая стойкость, незначительная усадка в процессе эксплуатации.

*К теплоизоляционным принято относить материалы, обладающие теплопроводностью не более 0,2 Вт/(м·°С).*

Широко распространены теплоизоляционные материалы на основе осадочной породы **диатомит**. Диатомитовая теплоизоляция применяется либо в виде засыпки (обожженный или необожженный порошок), либо в виде пористых диатомитовых кирпичей (например, марки Д-500). Отметим, что числовое обозначение в марке теплоизоляционного материала, как и огнеупора, соответствует величине плотности материала, но, в отличие от огнеупоров, плотность теплоизоляции в марке приводится не в граммах на кубический сантиметр, а в килограммах на кубический метр.

Таблица 1.1

## Основные свойства важнейших огнеупорных материалов

Материал	Вид изделий	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·°С), при температуре $t$ , °С	Максимальная рабочая температура, °С	Применение
Динас	Кирпичи, блоки	1900	$0,93+0,7 \cdot 10^{-3}t$	1650	Своды, арки, стены дуговых печей
Электродинас	То же	2000	$0,93+0,7 \cdot 10^{-3}t$	1700	
Магнезит	Набивки, прямоугольные и фасонные кирпичи	2600–2800	$6,15+2,67 \cdot 10^{-3}t$	1600	Стены, ванны, своды дуговых печей
Хромомагнезит	То же	2800–2900	$1,8 \dots 2,0$ (от 0 до 700°С)	1500	
Шамот класса А	Прямоугольные кирпичи	1800–1900	$0,7+0,64 \cdot 10^{-3}t$	1450	Огнеупорный слой футеровки печей сопротивления
Шамот класса Б	То же	1800–1900	$0,7+0,64 \cdot 10^{-3}t$	1350	
Шамот-легковес ШЛ-0,9	То же	900	$0,316+0,205 \cdot 10^{-3}t$	1270	Огнеупорный слой футеровки печей сопротивления; теплоизоляция дуговых печей
Шамот-легковес ШЛ-1,3	То же	1300	$0,325+0,097 \cdot 10^{-3}t$	1300	
Муллитокремнеземистый войлок МКРВ-200	Рулонный войлок	200	$0,055+0,096 \cdot 10^{-3}t$	1300	Огнеупорный слой футеровки печей сопротивления
Муллитокремнеземистая плита МКРП-450	Плиты	450	$0,126+0,159 \cdot 10^{-3}t$	1300	
Корунд	Прямоугольные кирпичи	2600–2900	$2,08+1,85 \cdot 10^{-3}t$	1900	Детали высокотемпературных печей
Графит	Фасонные изделия	1600–1700	$55 \dots 25$ (1700–2000°С)	3000	Тигли, муфели, детали печей

В настоящее время все большее распространение получают **теплоизоляционные материалы на основе минеральных волокон и минеральных ват**, получаемых из расплавов горных пород (базальта, перлита, андезита, гранита и др.) или из доменных шлаков. По сравнению с диатомитом, минеральные волокна и ваты обладают меньшей плотностью и теплопроводностью. Из минерального волокна (ваты) производят различные изделия в виде войлоков, шнуров, матов.

*В настоящее время санитарными и экологическими нормами Евросоюза запрещено использование теплоизоляционных материалов на основе асбеста и стекловаты. Применение стекловолкна диаметром нити более 0,02 мм и стеклотканей допускается.*

Основные свойства наиболее часто используемых теплоизоляционных материалов представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

### Основные характеристики часто применяемых теплоизоляционных материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м ·°С), при температуре $t$ , °С	Максимальная температура применения, °С
Диатомит необожженный (в кусках)	650	$0,171 + 0,233 \cdot 10^{-3} t$	900
Диатомит обожженный (порошок)	500	$0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} t$	900
Кирпич диатомитовый марки 500	500	$0,116 + 0,233 \cdot 10^{-3} t$	900
Плиты перлитовые	250	$0,07 + 0,186 \cdot 10^{-3} t$	900
Плиты вермикулитовые	250	$0,0814 + 0,233 \cdot 10^{-3} t$	600
Вата минеральная	150	$0,0582 + 0,186 \cdot 10^{-3} t$	600
Вата каолиновая	300	0,0523 (при 100 °С)	1100
Вермикулит обожженный (засыпка)	125	$0,0698 + 0,233 \cdot 10^{-3} t$	1100
Перлит вспученный (засыпка)	150	$0,0582 + 0,116 \cdot 10^{-3} t$	900

Наиболее близки к «идеальному» футеровочному материалу, сочетающему в себе свойства огнеупорных и теплоизоляционных материалов (довольно высокую огнеупорность и механическую прочность, с одной стороны, и низкую теплопроводность, с другой), **зернистые теплоизоляционные материалы** (*иногда их называют интегрированными теплоизоляционными и огнеупорными материалами*). На сегодняшний день для них характерны высокая стоимость и ряд технологических трудностей при изготовлении, однако следует ожидать расширения использования таких материалов.

В особую классификационную группу должны быть выделены **материалы для нагревательных элементов электрических печей сопротивления** (ЭПС), поскольку к ним предъявляются специфические требования, касающиеся их электрических свойств (удельного электрического сопротивления и его температурной и временной зависимости).

При заданных мощности и напряжении питания сопротивление нагревателя должно быть вполне определенным. Чем меньше удельное электрическое сопротивление материала, тем больше должна быть длина выполненного из него нагревателя, и тем меньше поперечное сечение нагревателя. Такой тонкий и длинный нагреватель конструктивно неудобен, его трудно разместить в печи, и срок его службы невелик. Поэтому *желательно, чтобы материалы для нагревателей имели довольно высокое удельное электрическое сопротивление* (порядка  $10^{-6}$  Ом·м).

*В то же время удельное электрическое сопротивление не должно быть слишком большим, желательно, чтобы материал обладал проводимостью металлического типа*, поскольку если материал практически не будет проводить ток, то и о выделении значительного количества тепла, что является главной функцией нагревателя, говорить не приходится.

Важным требованием к материалу для нагревателей является малое значение *температурного коэффициента сопротивления*, т.е. желательно, чтобы удельное электрическое сопротивление нагревателя мало изменялось при изменении температуры. Если этого добиться не удастся, то, по крайней мере, зависимость электрического сопротивления от температуры должна быть убывающей. Если же эта зависимость возрастающая (сопротивление в горячем состоянии существенно выше, чем в холодном), то при включении холодного нагревателя на номинальное напряжение возникает режим, аналогичный короткому замыканию.

Из-за выраженной и возрастающей зависимости сопротивления чистых металлов от температуры стараются не изготавливать нагреватели из таких металлов, отдавая предпочтение специальным сплавам с малым температурным коэффициентом сопротивления и некоторым неметаллическим материалам. Если же изготовление нагревателей из чистых металлов или иных материалов с большим положительным температурным коэффициентом сопротивления неизбежно (например, вольфрам или молибден в высокотемпературных вакуумных печах, дисилицид молибдена в высокотемпературных печах с воздушной средой), то для ограничения тока в холодном состоянии прогрев нагревателя нужно вести на пониженном напряжении, что приводит к усложнению системы питания печи.

Для материалов нагревателей также важно *отсутствие старения*, т.е. минимальное изменение удельного электрического сопротивления в ходе эксплуатации, иначе страдает воспроизводимость технологического процесса.

Материал нагревателей должен обладать *термостойкостью*, т.е. способностью выдерживать резкие изменения температуры.

Срок службы нагревателя в воздушной среде определяется, прежде всего, скоростью окисления его материала, а также улетом легирующих добавок, обеспечивающих жаростойкость и жаропрочность. При работе нагревателей в вакууме основной проблемой, ограничивающей срок службы нагревателей, является испарение материала нагревателей при пониженном давлении.

В низкотемпературных (рабочая температура до 700°C) и среднетемпературных (от 700 до 1300°C) печах сопротивления нагреватели, как правило, изготавливаются из **сплавов сопротивления** (полное название – сплавы высокого электрического сопротивления). Сплавы сопротивления поставляются в виде ленты, проволоки или стержней.

В таблице 1.3 указаны предельные и рекомендуемые температуры применения наиболее распространенных в РФ сплавов сопротивления (речь идет о температуре на нагревателе, которая в среднетемпературных печах превышает конечную температуру нагрева изделия обычно на 60–100°C). Под рекомендуемой температурой понимается температура на нагревателе, при которой достигается приемлемый срок его службы.

Таблица 1.3

### Основные свойства сплавов сопротивления

Марка сплава	Температура на нагревателе, °C		Удельное электрическое сопротивление, $10^{-6}$ Ом·м, при температуре $t$ , °C
	рекомендуемая	предельная	
X20H80-H	1150	1200	$1,12+0,029 \cdot 10^{-3}t$
X15H60-H	1050	1100	$1,12+0,120 \cdot 10^{-3}t$
X20H80	1050	1100	$1,10+0,031 \cdot 10^{-3}t$
X15H60	950	1000	$1,11+0,120 \cdot 10^{-3}t$
XH70Ю	1200	1250	$1,30+0,021 \cdot 10^{-3}t$
XH60Ю3	1200	1250	$1,30+0,064 \cdot 10^{-3}t$
X25H20	900	950	0,90 при 20°C
X27Ю5Т	1300	1350	$1,42+0,058 \cdot 10^{-3}t$
X23Ю5Т	1350	1400	$1,40+0,110 \cdot 10^{-3}t$
X23Ю5	1175	1200	$1,35+0,110 \cdot 10^{-3}t$
X13Ю4	900	1000	$1,27+0,180 \cdot 10^{-3}t$
X15Ю5	950	1000	$1,29+0,180 \cdot 10^{-3}t$
Cantal A	1330	Нет данных	1,42 при 20°C
Cantal A1	1375	Нет данных	1,40 при 20°C

Сплавы сопротивления характеризуются высоким удельным сопротивлением, малой его температурной зависимостью (значения сопротивления при комнатной температуре и при 1100°C различаются всего на 3–11% для разных марок сплавов).

К сплавам сопротивления относятся **нихромы** и **безникелевые сплавы сопротивления**. Нихромы – это сплавы никеля, хрома и железа, разработанные специально в качестве материалов для нагревательных элементов и поэтому в наибольшей степени соответствующие вышеуказанным требованиям. Нихром впервые получен английским металлургом Г. Маршем в 1906 г.

Нихромы повышенного качества (марок Х20Н80-Н и Х15Н60-Н) дополнительно легированы небольшим количеством редкоземельных и иных элементов, включая молибден, и подвергаются прецизионному отжигу после волочения или прокатки.

Главным недостатком нихромов является их высокая стоимость. Поэтому на протяжении десятков лет велись интенсивные поиски других сплавов, более дешевых и доступных и в то же время способных заменить нихромы в тех или иных условиях. Такой альтернативой стали освоенные производством в 60-70-х гг. XX в. *железохромоалюминиевые сплавы*, их еще называют *безникелевыми сплавами сопротивления*. Рабочая температура их некоторых марок (например, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т) может быть даже выше, чем у нихромов, и достигать 1300–1350°C. Однако безникелевые сплавы уступают нихромам по механическим свойствам, менее технологичны при сварке и пластической деформации (из них трудно изготовить спираль или зигзаг с малым шагом).

Безникелевые сплавы менее *термостойки*, чем нихром, при температурах свыше 1000°C они хрупки и менее прочны по сравнению с нихромом, что накладывает ограничения на размер нагревателей. Безникелевые сплавы, в отличие от нихрома, ржавеют и поэтому чувствительны к попаданию влаги в рабочее пространство печи.

Следует помнить, что *нагреватели из железохромоалюминиевых сплавов обеспечивают приемлемый срок службы только при условии высокой культуры их эксплуатации*.

Безникелевые сплавы сопротивления надежнее нихромов работают в науглероживающей среде (эндогаз, метан), нихромы обладают лучшей стойкостью в вакууме.

Зарубежными аналогами отечественных безникелевых сплавов сопротивления Х23Ю5Т, Х27Ю5Т являются *Cantal A*, *Cantal A1*, Еврофехраль, Суперфехраль, цекас, мегапир, сплав Смита № 10 и др.

Отечественные сплавы ХН70Ю и ХН60ЮЗ по своим свойствам занимают промежуточное положение между нихромами и безникелевыми сплавами. Они могут применяться при температурах до 1200°C.

*В высокотемпературных (свыше 1300°C) печах с воздушной средой нагреватели выполняются из неметаллических материалов – карбида кремния (рабочая температура до 1450°C), дисилицида молибдена и хромита лантана (до 1800°C). Такие нагреватели имеют стержневую или U-образную конструкцию.*

В настоящее время нагреватели из хромита лантана используются все более широко и во многих случаях вытесняют как карбидкрениевые (карборундовые), так и нагреватели из дисилицида молибдена. От карбида кремния хромит лантана выгодно отличается стабильностью свойств в ходе эксплуатации (отсутствием старения) и меньшим разбросом удельного сопротивления в пределах поставляемой партии, от дисилицида молибдена – убывающей температурной зависимостью удельного сопротивления и существенно меньшей стоимостью при схожих эксплуатационных свойствах (за исключением более низкой термостойкости). Срок непрерывной работы нагревателей из хромита лантана при температуре 1500°C составляет 3–5 лет.

Особый интерес представляют материалы, предназначенные для использования в высокотемпературных вакуумных или газонаполненных печах, в которых достигаются температуры до 3000°C и выше. В таких печах и нагревательные элементы, и другие элементы конструкции (направляющие, подвесы, подставки под нагреваемое изделие и т.д.), и теплоизоляция (обычно экранная) изготавливаются из материалов, способных работать при весьма высоких температурах. К числу таких материалов относятся тугоплавкие металлы (как правило, вольфрам, молибден и их сплавы), графит и углерод-углеродные композиционные материалы, тугоплавкие карбиды.

Молибден используется при температурах до 1700°C в вакууме и до 2200°C в чистой защитной среде (аргон). Вольфрам и углеродные материалы возможно использовать в вакууме при 2400–2500°C, в аргоне – при 3000°C и несколько выше.

Весьма перспективными материалами для высокотемпературных вакуумных и газонаполненных печей являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ или УКМ), обладающие высокой механической прочностью, термостойкостью и химической стойкостью. Из УУКМ изготавливают нагреватели и теплоизоляцию печей на температуры 2800°C и выше для ряда уникальных технологических процессов.

Отметим, что совершенствование технологии производства материалов для электротермических установок, появление новых материалов являются важнейшими факторами развития электротермии, повышения производительности печей, увеличения срока службы, рабочих температур, уменьшения потерь тепла.

### 1.3. Типовые задачи по теплопередаче в электротехнологических установках

#### **Задача 1.1. Расчет тепловых потерь через однослойную стенку**

Определить потери тепла через кирпичную стенку длиной 5 м, высотой 1 м и толщиной 250 мм, если на поверхности поддерживаются температуры 200°C и 60°C.

Рассматриваемая ситуация имеет место при оценке тепловых потерь действующей печи сопротивления, когда измеряются температуры на внутренней и наружной поверхностях футеровки и по результатам измерений рассчитываются потери. При проектировании печей в большинстве случаев задаются температурой внутри печи и температурой окружающего воздуха, а температура наружной поверхности футеровки (кожуха) рассчитывается, как и температуры на границах слоев футеровки и тепловые потери. Однослойная футеровка используется в низкотемпературных (до 400–500°C) печах, применяемых, например, для сушки.

Расчет тепловых потерь через футеровку (стенку) осуществляем с учетом зависимости теплопроводности ее материалов от температуры, поскольку такая зависимость для огнеупорных и теплоизоляционных материалов возрастающая, и ее неучет приводит к занижению величины потерь на 10–30% в зависимости от температуры.

В качестве определяющей температуры, при которой берется значение теплопроводности, принимаем среднее арифметическое значение температур на поверхностях стенки (130°C).

Теплопроводность материала стенки (красный строительный кирпич) при температуре  $t$ , °C согласно справочным данным [5]

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{кирп}} &= 0,814 + 0,465 \cdot 10^{-3}t = 0,814 + 0,465 \cdot 10^{-3} \cdot 130 = \\ &= 0,874 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}.\end{aligned}$$

По выражению для расчета потерь тепла через плоскую однослойную стенку толщиной  $S$  и расчетной поверхностью  $F_p$

$$P = \lambda \frac{t_1 - t_2}{S} F_p = 0,874 \cdot \frac{200 - 60}{0,25} \cdot 5 \cdot 1 = 2447,2 \text{ Вт}.$$

Округленно можно считать  $P = 2,5 \text{ кВт}$ , при этом погрешность округления  $([(2500 - 2447) / 2500] \cdot 100\%)$  составляет 2,17%.

#### **Задача 1.2. Расчет тепловых потерь через футеровку низкотемпературной печи**

Определить потери тепла через футеровку электропечи сопротивления (ЭПС) для сушки (рис. 1.4). Толщина футеровки 460 мм (кладка в два кирпича стандарт-

ного размера  $230 \times 113 \times 65$  мм), внутренняя поверхность камеры  $F_1 = 10$  м<sup>2</sup>, наружная поверхность футеровки  $F_2 = 20$  м<sup>2</sup>, температура внутренней поверхности  $t_1 = 250^\circ\text{C}$ , наружной поверхности  $t_2 = 70^\circ\text{C}$ .

В отличие от предыдущей задачи, рассчитываются потери не через отдельную стенку, а суммарные потери через всю футеровку печи.

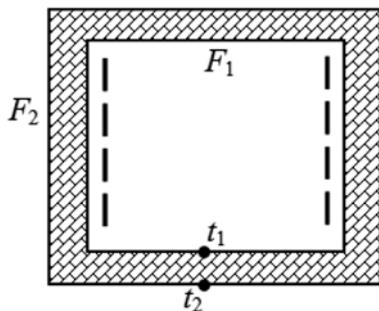


Рис. 1.4. К расчету тепловых потерь через футеровку низкотемпературной печи

Теплопроводность материала футеровки (красный строительный кирпич) при определяющей температуре  $160^\circ\text{C}$  ( $(250 + 70) / 2$ ) [5]

$$\lambda_{\text{кирп}} = 0,814 + 0,465 \cdot 10^{-3} t = 0,814 + 0,465 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 0,888 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}.$$

Для определения тепловых потерь через футеровку печи в целом применимо выражение для плоской стенки конечных размеров

$$P = \lambda \frac{t_1 - t_2}{S} F_p.$$

Расчетная поверхность стенки определяется как

$$F_p = \begin{cases} (F_1 + F_2) / 2, & F_2 / F_1 < 2 \\ \sqrt{F_1 F_2}, & F_2 / F_1 \geq 2 \end{cases}.$$

В нашем случае  $F_p = \sqrt{10 \cdot 20} = 14,14 \text{ м}^2$ .

$$P = 0,888 \cdot \frac{250 - 70}{0,460} \cdot 14,4 = 4914 \text{ Вт}.$$

Округление результата проведем в *большую* сторону, чтобы не занижить *потери* печи. Это важно, поскольку справочные данные по теплопроводности огнеупорных материалов приводятся со значительной погрешностью, достигающей 10%.

Таким образом,  $P = 5$  кВт, при этом погрешность округления составляет 1,75%.

**Задача 1.3. Расчет тепловых потерь через многослойную стенку (с учетом конвективной теплоотдачи от поверхности)**

Определить тепловые потери боковой стенки камерной печи сопротивления (рис. 1.5) и температуры на границах слоев футеровки. Стенка состоит из огнеупорного слоя (шамот-легковес ШЛ-1,3) толщиной  $S_1 = 113$  мм и теплоизоляционного слоя (диатомитовый кирпич марки Д-500) толщиной  $S_2 = 230$  мм. Температура печи  $t_1 = 800^\circ\text{C}$ , температура наружного воздуха  $t_{\text{нар}} = 20^\circ\text{C}$ . Размер внутренней поверхности стенки  $F_1 = 1 \times 1$  м.

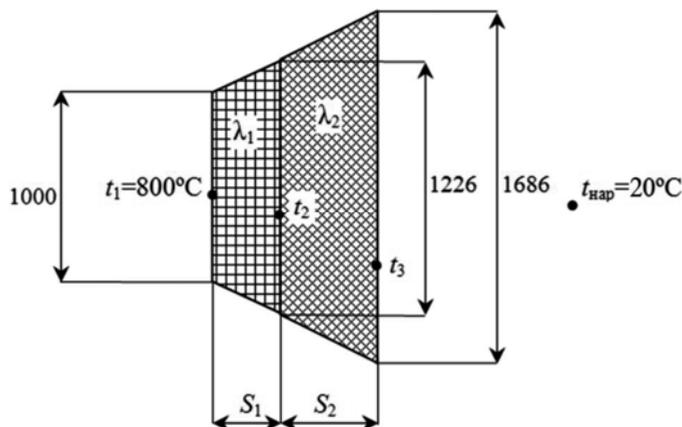


Рис. 1.5. К расчету тепловых потерь многослойной стенки ЭПС

При расчете тепловых потерь в средне- и высокотемпературных печах (печах с теплопередачей преимущественно излучением) температура внутренней поверхности стенки принимается равной температуре печи [3], которая определяется требованиями технологического процесса, температурой наружного воздуха задается. Здесь рассматривается именно случай печи с преимущественно излучательным теплообменом.

Площадь поверхности раздела огнеупорного и теплоизоляционного слоев

$$F_2 = (1 + 2 \cdot 0,113) \times (1 + 2 \cdot 0,113) = 1,226 \times 1,226 = 1,5 \text{ м}^2,$$

площадь наружной поверхности стенки (площадь кожуха)

$$F_3 = (1,226 + 2 \cdot 0,23) \times (1,226 + 2 \cdot 0,23) = 1,686 \times 1,686 = 2,82 \text{ м}^2.$$

Определяем расчетные поверхности шамота  $F_1$  и диатомита  $F_{\text{II}}$ , учитывая, что  $F_2/F_1 < 2$ ,  $F_3/F_2 < 2$ :

$$F_1 = (F_1 + F_2)/2 = (1 + 1,5)/2 = 1,25 \text{ м}^2,$$

$$F_{\text{II}} = (F_2 + F_3)/2 = (1,5 + 2,82)/2 = 2,16 \text{ м}^2.$$

Теплопроводность шамота-легковеса ШЛ-1,3 согласно [5]

$$\lambda_1 = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3}t,$$

теплопроводность диатомитового кирпича Д-500 согласно [4]

$$\lambda_2 = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3}t.$$

*Необходимо учитывать температурную зависимость теплопроводности материалов (нелинейная задача), поэтому задача решается итерационным путем.*

Задаемся начальным приближением температуры на кожухе печи  $t_3 = 50^\circ\text{C}$ . При задании начального приближения температуры на границе слоев  $t_2$  будем учитывать, что тепловое сопротивление теплоизоляционного слоя будет примерно (если ориентироваться на значения теплопроводности при  $0^\circ\text{C}$ ) в 4 раза больше, чем тепловое сопротивление огнеупорного слоя. Действительно, теплопроводность теплоизоляции меньше примерно в 4 раза, толщина теплоизоляции больше примерно в 2 раза, расчетная поверхность теплоизоляции больше примерно в 2 раза, таким образом,  $\frac{4 \cdot 2}{2} = 4$ . Следовательно, и изменение температуры на теплоизоляционном слое будет в 4 раза больше, чем на огнеупорном, и если разность температур  $(t_1 - t_3)$  принять за единицу, то  $4/5$  придется на  $(t_2 - t_3)$ , и  $1/5$  – на  $(t_1 - t_2)$ .

На основании этого принимаем  $t_2 = 800 - (1/5) \cdot (800 - 50) = 650^\circ\text{C}$ .

*Удачный выбор начального приближения температуры позволяет уменьшить число итераций.*

Принимая в качестве определяющей температуры для каждого слоя среднее арифметическое температур на границах, определяем значение теплопроводности

$$\lambda_1 = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot (800 + 650)/2 = 0,660 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$\lambda_2 = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot (650 + 50)/2 = 0,187 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Значение коэффициента теплоотдачи конвекцией от наружной поверхности стенки определяем по таблице из [2] либо по эмпирической формуле

$$\begin{aligned} \alpha &= 8,4 + 0,06(t_{\text{стенки}} - t_{\text{окр. среды}}) = 8,4 + 0,06(t_4 - t_{\text{нар}}) = \\ &= 8,4 + 0,06 \cdot (50 - 20) = 10,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \end{aligned}$$

Тепловые потери определяем по выражению для многослойной плоской стенки конечных размеров с учетом конвективной теплоотдачи от поверхности

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{t_1 - t_{\text{нар}}}{\frac{S_1}{\lambda_1 F_I} + \frac{S_2}{\lambda_2 F_{II}} + \frac{1}{\alpha F_3}} = \\
 &= \frac{800 - 20}{\frac{0,113}{0,660 \cdot 1,25} + \frac{0,230}{0,187 \cdot 2,16} + \frac{1}{10,2 \cdot 2,82}} = \\
 &= \frac{780}{0,1370 + 0,5694 + 0,0348} = 1052 \text{ Вт}.
 \end{aligned}$$

Отметим, что тепловым сопротивлением тонкостенного стального кожуха печи можно пренебречь, поскольку оно незначительно в сравнении с тепловыми сопротивлениями огнеупорного слоя и теплоизоляции.

Зная величину тепловых потерь и тепловые сопротивления слоев, определяем расчетные значения  $t_2$  и  $t_3$ :

$$t_2 = t_1 - P \cdot \frac{S_1}{\lambda_1 F_I} = 800 - 1052 \cdot 0,1370 = 656 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_3 = t_2 - P \cdot \frac{S_2}{\lambda_2 F_{II}} = 656 - 1052 \cdot 0,5694 = 57 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Совпадение расчетных значений температур с начальным приближением недостаточно хорошее (для  $t_3$  несовпадение 14%), поэтому проводится следующая итерация, определяющими температурами слоев будут  $(800+656)/2=728^\circ\text{C}$  и  $(656+57)/2=356,5^\circ\text{C}$ .

$$\lambda_1 = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 728 = 0,661 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$\lambda_2 = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 356,5 = 0,188 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$\alpha = 8,4 + 0,06(t_4 - t_{\text{нар}}) = 8,4 + 0,06(57 - 20) = 10,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Тепловые потери

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{800 - 20}{\frac{0,113}{0,661 \cdot 1,25} + \frac{0,230}{0,188 \cdot 2,16} + \frac{1}{10,62 \cdot 2,82}} = \\
 &= \frac{780}{0,1368 + 0,5664 + 0,0334} = 1059 \text{ Вт}.
 \end{aligned}$$

Проверяем температуры:

$$t_2 = 800 - 1059 \cdot 0,1368 = 655 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_3 = 655 - 1059 \cdot 0,5664 = 55 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Отметим, что к  $t_3$  можно прийти и «со стороны» температуры наружного воздуха:

$$t_3 = t_{\text{нар}} + P \cdot \frac{1}{\alpha F_3} = 20 + 1059 \cdot 0,0334 = 55 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Несовпадение температуры на границе слоев с предыдущим приближением  $\frac{656 - 655}{656} \cdot 100\% = 0,15\%$ , несовпадение температуры кожуха  $\frac{57 - 55}{57} \cdot 100\% = 3,5\%$ .

Совпадение в пределах 5% для тепловых расчетов ЭПС считается хорошим, поэтому можно утверждать, что задача успешно решена. Отметим, что температура на границе слоев не превышает допустимую для диатомита, а температура кожуха не превышает разрешенную по санитарным нормам ( $60^\circ\text{C}$ ), поэтому переработка конструкции футеровки не требуется.

*Если теплообмен в печи осуществляется преимущественно конвекцией, то определяющее значение для процессов в печи имеет не температура стенки, а температура газовой среды в печи, и именно она в этом случае задается при расчете тепловых потерь через футеровку, а в выражение для тепловых потерь добавляется тепловое сопротивление конвективной теплопередачи от среды к внутренней поверхности стенки  $\frac{1}{\alpha_{\text{внутр}} F_1}$ .*

#### **Задача 1.4. Подбор эквивалентной замены материала теплоизоляции**

Плоская стенка стальной емкости, имеющая толщину 25 мм, изолирована от тепловых потерь слоем асбеста толщиной 100 мм и слоем пробки толщиной 100 мм.

Определить, какой толщины теплоизоляцию из каолиновой ваты нужно наложить на эту же стальную стенку вместо асбеста и пробки, чтобы теплоизоляционные свойства системы остались без изменения.

*Теплоизоляция на основе асбеста в настоящее время не рекомендуется к применению санитарными нормами и подлежит замене.*

Плотность теплового потока через трехслойную стенку из стали, асбеста и пробки определяется как

$$q' = \frac{\Delta t}{\frac{S_{\text{стали}}}{\lambda_{\text{стали}}} + \frac{S_{\text{асбеста}}}{\lambda_{\text{асбеста}}} + \frac{S_{\text{пробки}}}{\lambda_{\text{пробки}}}},$$

где  $\lambda$ ,  $S$  – теплопроводность и толщина соответствующих слоев;  $\Delta t$  – разница температур внутренней и наружной поверхностей стенки.

Аналогично плотность теплового потока через двухслойную стенку из стали и каолиновой ваты определяется как

$$q'' = \frac{\Delta t}{\frac{S_{\text{стали}}}{\lambda_{\text{стали}}} + \frac{S_{\text{КВ}}}{\lambda_{\text{КВ}}}}.$$

При замене асбеста и пробки на каолиновую вату теплоизоляционные свойства системы не должны измениться, а это означает, что  $q'' = q'$ , а  $\Delta t$  должна остаться неизменной.

Поэтому можно приравнять

$$\frac{S_{\text{стали}}}{\lambda_{\text{стали}}} + \frac{S_{\text{асбеста}}}{\lambda_{\text{асбеста}}} + \frac{S_{\text{пробки}}}{\lambda_{\text{пробки}}} = \frac{S_{\text{стали}}}{\lambda_{\text{стали}}} + \frac{S_{\text{КВ}}}{\lambda_{\text{КВ}}}.$$

Тепловое сопротивление стали в левой и правой частях равенства можно сократить

$$\frac{S_{\text{асбеста}}}{\lambda_{\text{асбеста}}} + \frac{S_{\text{пробки}}}{\lambda_{\text{пробки}}} = \frac{S_{\text{КВ}}}{\lambda_{\text{КВ}}}.$$

Отсюда неизвестная толщина слоя каолиновой ваты определяется как

$$S_{\text{КВ}} = \lambda_{\text{КВ}} \left( \frac{S_{\text{асбеста}}}{\lambda_{\text{асбеста}}} + \frac{S_{\text{пробки}}}{\lambda_{\text{пробки}}} \right).$$

Поскольку температура неизвестна, значения теплопроводности материалов берем при 20°C. По данным [5] теплопроводность асбеста  $\lambda_{\text{асбеста}}$  при этом будет 0,116 Вт/(м·°C), теплопроводность пробки  $\lambda_{\text{пробки}} = 0,042$  Вт/(м·°C), теплопроводность каолиновой ваты  $\lambda_{\text{КВ}} = 0,052$  Вт/(м·°C).

$$S_{\text{КВ}} = 0,052 \cdot \left( \frac{0,1}{0,116} + \frac{0,1}{0,042} \right) = 0,169 \text{ м.}$$

Таким образом, теплоизоляционные свойства системы не изменятся при замене слоя асбеста толщиной 100 мм и слоя пробки толщиной 100 мм на слой каолиновой ваты толщиной **169 мм**.

Является ли это решение точным? Нет, поскольку не заданы температурные условия, теплопроводность материалов взята при температуре 20°C, ответ приближенный.

### **Задача 1.5. Расчет потерь через тепловое короткое замыкание (ролик рольганга)**

Определить тепловые потери теплопроводностью через ролик рольганга электропечи. Температура печи  $t_{\text{п}} = 1000^\circ\text{C}$ , толщина футеровки  $S_{\text{ф}} = 300$  мм. Ролик (рис. 1.6) представляет собой полую трубу из жаропрочной стали 12Х18Н10Т наружным диаметром 60 мм, внутренним 40 мм, с шамотной засыпкой, опорная часть ролика водоохлаждаемая.

*Тепловыми короткими замыканиями называют металлоконструкции, проходящие насквозь через футеровку печи, через которые происходит интенсивная утечка тепла. Примерами тепловых коротких замыканий являются выводы нагревателей, термонар, ролики рольгангов (роликовых конвейеров, осуществляющих перемещение нагреваемых изделий в печи).*

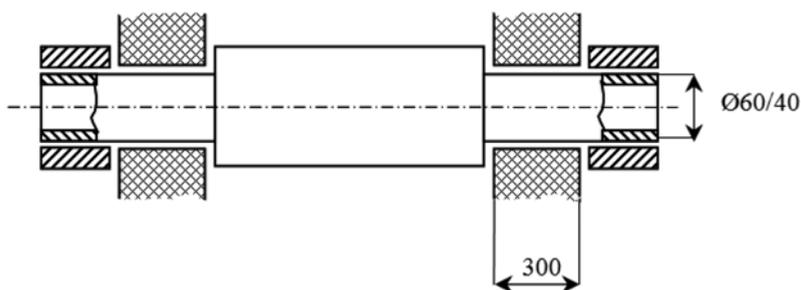


Рис. 1.6. К расчету тепловых потерь через ролик рольганга

Ролик изготавливается из жароупора в виде полрой трубы, внутри имеет шамотную засыпку. Концевые участки роликов, установленные в опоры снаружи печи, не имеют засыпки, полости концевых участков омываются охлаждающей водой для предотвращения заклинивания ролика в опорах.

Расход охлаждающей воды подбирается таким образом, чтобы температура опорной части ролика  $t_o$  не превышала  $50^\circ\text{C}$ , иначе возможно образование накипи.

Тепловые потери через ролик определяются как

$$P = 2\lambda \frac{t_{\text{п}} - t_o}{S_{\text{ф}}} F_o.$$

Коэффициент 2 введен в это выражение, поскольку должны учитываться потери через оба конца ролика. Теплопроводящее сечение  $F_o$  представляет собой сечение металла трубы диаметром 60/40 мм

$$F_o = \pi \frac{d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,06^2 - 0,04^2}{4} = 0,00157 \text{ м}^2.$$

Теплопроводность стали 12Х18Н10Т при температуре  $525^\circ\text{C}$  (среднее арифметическое  $t_{\text{п}}$  и  $t_o$ ) составляет  $23 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

Величина тепловых потерь через ролик

$$P = 2 \cdot 23 \cdot \frac{1000 - 50}{0,3} \cdot 0,00157 = 228,7 \text{ Вт}.$$

Таким образом, тепловые потери через ролик рольганга составляют примерно **230 Вт**. Это относительно небольшая величина, однако рольганг состоит из большого количества роликов (нескольких десятков), поэтому суммарные потери через все ролики могут быть значительными.

### **Задача 1.6. Сравнение принудительного воздушного и принудительного водяного охлаждения элементов конструкции**

Через трубу внутренним диаметром 60 мм и длиной 3 м продувается воздух со скоростью  $w = 5$  м/с при давлении 1 атмосфера (100 кПа). Средняя температура воздуха  $100^\circ\text{C}$ , температура стенки трубы  $200^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху.

Как изменится величина коэффициента теплоотдачи, если вместо воздуха через трубу пропускать воду при средней температуре  $50^\circ\text{C}$  со скоростью 0,8 м/с?

Чтобы воспользоваться критериальными уравнениями для расчета коэффициента теплоотдачи, необходимо принять определяющий размер и определяющую температуру. В нашем случае определяющим размером будет внутренний диаметр трубы (0,06 м), определяющей температурой (при которой берутся значения теплофизических параметров, входящих в критерии подобия) – среднее арифметическое температур среды (воздуха) и стенки ( $150^\circ\text{C}$ ).

Теплофизические параметры воздуха при  $150^\circ\text{C}$ : кинематическая вязкость  $\nu = 30 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, значение критерия Прандтля  $Pr = 0,683$ , теплопроводность  $\lambda = 0,034$  Вт/(м·°C).

Решение задачи начинается с определения режима течения (ламинарный или турбулентный), поскольку для разных режимов справедливы разные критериальные уравнения. Для этого определим значение числа Рейнольдса

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{5 \cdot 0,06}{30 \cdot 10^{-6}} = 10^4.$$

Это значение числа Рейнольдса (10 000) теоретически является нижней границей режима развитого турбулентного течения. Учитывая, что поверхность трубы не идеально гладкая (т.е. имеются искусственные турбулизаторы), можно считать, что развитый турбулентный режим наступает при  $Re$  несколько меньше 10 000.

Поскольку течение развитое турбулентное, естественной конвекцией пренебрегаем. Находим значение критерия Нуссельта по формуле Михеева

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} = 0,021 \cdot 10\,000^{0,8} \cdot 0,683^{0,43} = 28,25.$$

Из критерия Нуссельта ( $Nu = \alpha d / \lambda$ ) определяем значение коэффициента теплоотдачи при принудительном воздушном охлаждении

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d = 28,25 \cdot 0,034 / 0,06 = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Рассмотрим теперь случай принудительного водяного охлаждения. Определяющей температурой будет температура воды ( $50^\circ\text{C}$ ). При  $50^\circ\text{C}$  теплопроводность воды  $0,68$  Вт/(м·°C), кинематическая вязкость  $0,556 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, значение критерия Прандтля 3,59.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{0,8 \cdot 0,06}{0,556 \cdot 10^{-6}} = 8648.$$

С учетом шероховатостей трубы режим течения можно считать близким к развитому турбулентному.

По формуле Михеева

$$\begin{aligned} Nu &= 0,021 \cdot 8648^{0,8} \cdot 3,59^{0,43} = 51,3. \\ \alpha &= 51,3 \cdot 0,68 / 0,06 = 582 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}). \end{aligned}$$

Таким образом, коэффициент теплоотдачи при принудительном водяном охлаждении оказался в **36 раз выше**, чем при принудительном воздушном. Водяное охлаждение будет еще более эффективным, если вода будет использоваться не в режиме протока-омывания, а в режиме *пузырькового кипения*.

### **Задача 1.7. Расчет конвективной теплоотдачи от стенки электропечи**

Определить мощность, отдаваемую конвекцией боковыми стенками электрической печи непрерывного действия. Наружный размер боковой стенки печи 1,5×6 м, температура поверхности стен 60°С, температура окружающего воздуха 20°С.

В данном случае определяющим размером будет высота стенки  $h = 1,5$  м, определяющая температура  $t = 0,5 \cdot (60 + 20) = 40$ °С.

Находим по таблицам значения физических параметров воздуха, входящих в критерии подобия, при температуре 40°С:  $\beta = 0,0032$ ,  $\lambda = 0,0228$  Вт/(м·°С),  $\nu = 1,76 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $Pr = 0,722$ .

Значение критерия Грасгофа:

$$Gr = \beta \frac{gL^3}{\nu^2} \Delta t = 0,0032 \cdot \frac{9,8 \cdot 1,5^3}{(1,76 \cdot 10^{-5})^2} \cdot (60 - 20) = 13,7 \cdot 10^9.$$

Для естественной конвекции используется критериальное уравнение

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n.$$

Согласно [1] определяем значения параметров  $n = 1/3$  и  $C = 0,135$ . Подставляем эти значения в критериальное уравнение и получаем значение критерия Нуссельта  $Nu = 289$ .

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{h} = 4,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Суммарная площадь наружной поверхности двух боковых стенок печи

$$F = 2 \cdot 1,5 \cdot 6 = 18 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери боковых стенок печи

$$P_{\text{пот}} = \alpha(t_1 - t_2)F = 4,4 \cdot (60 - 20) \cdot 18 = 3168 \text{ Вт}.$$

## Контрольные вопросы

1. Каково необходимое условие теплопередачи теплопроводностью?
2. От каких факторов зависит величина тепловых потерь через плоскую стенку?
3. Почему для моделирования процессов теплопередачи теплопроводностью часто используют численные методы?
4. Что такое теплопередача конвекцией?
5. Какие виды конвекции существуют? В чем их различие?
6. Какие тела называют абсолютно черными? Что характеризует степень черноты тела?
7. От каких факторов зависит интенсивность теплообмена излучением между двумя телами?
8. Как соотносятся между собой конвективная и излучательная составляющие теплообмена при малых температурах? При более высоких? Почему?
9. Какие специфические требования предъявляются к жароупорным сталям и сплавам, применяемым в конструкциях электропечей?
10. Легирование какими элементами в наибольшей степени придает жаростойкость сталям и сплавам?
11. Чем различаются механические свойства хромистых и хромоникелевых жароупорных сталей и сплавов?
12. Как влияет на жаростойкость конструкционных материалов нанесение различных покрытий, в том числе алитирование?
13. Какова предельная температура использования жароупоров в электропечах? Из каких материалов изготавливаются элементы конструкций электропечей, работающие при более высоких температурах?
14. Какие специфические требования предъявляются к огнеупорным материалам?
15. Каковы преимущества и недостатки легковесных и волокнистых огнеупоров?
16. Какие специфические требования предъявляются к теплоизоляционным материалам, применяемым в конструкциях электропечей?
17. Какие теплоизоляционные материалы наиболее часто применяются в конструкциях электропечей?
18. Как соотносятся теплопроводность и плотность диатомита и теплоизоляционной минеральной ваты?
19. Почему не рекомендуется применение теплоизоляционных материалов на основе асбеста и стекловаты?

20. Какими особыми свойствами обладают зернистые теплоизоляционные материалы (интегрированные огнеупорные и теплоизоляционные материалы)?

21. Какие специфические требования предъявляются к материалам для нагревателей электропечей сопротивления?

22. Каковы сравнительные преимущества и недостатки никельсодержащих и безникелевых сплавов сопротивления?

23. Какие сплавы сопротивления – безникелевые или никельсодержащие – предпочтительны при работе в вакууме? В углеродсодержащей среде?

24. Почему нагреватели из хромита лантана все чаще используются вместо карбидокремниевых нагревателей и нагревателей из дисилицида молибдена?

25. Почему нагреватели из тугоплавких металлов и дисилицида молибдена нельзя включать на полное напряжение в холодном состоянии?

26. Чем определяется срок службы нагревателей из различных материалов при работе в воздушной среде? В вакууме?

27. Нагреватели из каких материалов можно использовать в различных температурных диапазонах в средне- и высокотемпературных вакуумных печах?

### **Список рекомендуемой литературы**

1. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977.

2. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи. Ч. 1. Электрические печи сопротивления / А.Д. Свенчанский. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1975.

3. Погребиский, М.Я. Теплопередача в электрических печах сопротивления: учеб. пособие / М.Я. Погребиский, О.К. Киренская, Н.Г. Батов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

4. Погребиский, М.Я. Материалы для электрических печей сопротивления: учеб. пособие / М.Я. Погребиский, Н.Г. Батов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.

5. Электротермическое оборудование: справочник / под общ. ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980.

## ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ НАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЯ

### 2.1. Принцип действия, классификация и области применения

**Электронагрев сопротивления (резистивный нагрев)** – это нагрев джоулевым теплом, выделяющимся при протекании электрического тока непосредственно по сечению нагреваемого изделия (**прямой нагрев сопротивления**) или по стороннему нагревателю (**косвенный нагрев сопротивления**).

Прямой нагрев сопротивления также называют **электроконтактным нагревом**.

Установки нагрева сопротивления часто называют **электрическими печами сопротивления (ЭПС)**.

Первые опубликованные работы по изучению процессов нагрева проводников при протекании электрического тока относятся к середине XVIII в. С середины XIX века было получено множество патентов на устройства, использующие резистивный нагрев, однако их промышленное внедрение было затруднено из-за недостаточных объемов производства электроэнергии [1,2].

В 1886–1888 гг. братья Коульс (США) создали печь прямого электронагрева для получения алюминия из глинозема (в этой конструкции одновременно с расплавлением глинозема шел электролиз). Ток проходил между электродами через слой шихты, а мощность печи составляла 300 кВт (напряжение 60 В, ток до 6000 А). В 1892 г. Е. Ачесон (США) разработал печь для получения карбида кремния (карборунда) из смеси песка, кокса и других материалов прямым протеканием тока мощностью почти 800 кВт. Позже, в 1898 г. В. Борхерс (Германия) создал опытную печь для восстановления оксидов с угольным нагревателем.

Создание и промышленное внедрение печей сопротивления косвенного нагрева, являющихся более универсальными установками с технологической точки зрения, было начато значительно позже, и это было связано с отсутствием подходящих для использования материалов для нагревательных элементов. Первые сплавы сопротивления и неметаллические материалы, пригодные для изготовления нагревателей, были разработаны уже в XX веке. Так, в 1904 г. Эгли (Германия) предложил способ получения изделий любой формы из силита (карбида кремния), а в 1906 г. А. Маршем (США) был разработан первый нихромовый сплав. В начале 1920-х годов компанией «Дженерал электрик» (США) была внедрена первая технология производства трубчатых электронагревателей (ТЭН), конструкция и принцип действия которых были запатентованы еще в 1859 г. [2].

В СССР производство электропечей сопротивления (ЭПС) было налажено в 1928–1930 гг. на заводе «Электрик» в Ленинграде (до этого печи закупались за границей). В 1931 г. там серийно выпускались камерные печи с нихромовыми нагревателями. Московский электрозавод в 1933 г. изготовил плавильную ЭПС для алюминиевых сплавов. С 1934 г. печи сопротивления стали производиться на заводе «Меткой», позднее переименованном в Московский завод электротермического оборудования (МосЗЭТО). Завод «Электрик» освоил выпуск толкательных печей (1935г.), а завод «Уралэлектромашина» – шахтных печей и печей с шагающим подом для термообработки тонких труб из спецсплавов (1937 г.). С 1950 г. МосЗЭТО серийно стал выпускать конвейерные печи. Значительный вклад в разработку и внедрение ЭПС внесло ОКБ «Электропечь», позднее преобразованное во ВНИИ электротермического оборудования (ВНИИЭТО), директором которого стал А.П. Альтгаузен. Значительный вклад в разработку методов расчета и проектирования электрических печей сопротивления внесли А.Д. Свенчанский, Н.М. Некрасова и другие сотрудники кафедры электротермических установок Московского энергетического института (МЭИ), а также известные ученые и специалисты В.С. Чередниченко, А.С. Бородачев, Э.Н. Мармер и др.

Сегодня область применения установок электронагрева сопротивления чрезвычайно широка – это плавка металлов, получение композитных материалов, термическая обработка и пайка в контролируемой атмосфере и вакууме, сушка, спекание и полимеризация различных материалов и покрытий, обогрев помещений (электроконвекторы, инфракрасные излучатели, кабельный обогрев напольных покрытий), нагрев воды и различных теплоносителей и приготовление пищи.

*Преимуществами* электронагрева сопротивления являются:

- 1) возможность нагрева тел любой формы и любого размера из любого материала (относится только к косвенному нагреву);
- 2) возможность автоматического регулирования температурного режима с высокой точностью;
- 3) высокий КПД (до 80% и более в зависимости от конструкции установки и технологического процесса);
- 4) питание от сети промышленной частоты, не требуются специальные источники питания;
- 5) практически активная нагрузка ( $\cos\phi$  стремится к 1);
- 6) встраиваемость в поточные линии;
- 7) экологическая безопасность, благоприятные условия труда персонала.

По сравнению с некоторыми другими видами нагрева, для электронагрева сопротивления характерны следующие *недостатки*:

- 1) отсутствие объемного тепловыделения в загрузке (для печей косвенного нагрева) ограничивает скорость нагрева и снижает равномерность температурного поля по сечению изделия;
- 2) длительность процессов в печах косвенного нагрева способствует образованию окалины и часто требует использования защитной атмосферы;

3) производительность печи и ее рабочая температура лимитированы стойкостью нагревателей.

*По режиму работы* ЭПС косвенного нагрева делятся на **печи периодического действия (садочные)** и **печи непрерывного действия (методические)**.

В печах периодического действия положение нагреваемого изделия (загрузки) неизменно в течение всего времени пребывания в печи. При этом температура печи изменяется в ходе технологического процесса (иначе говоря, загрузка нагревается и остывает вместе с печью). Технологический цикл включает в себя загрузку изделий, их нагрев, выдержку при постоянной температуре, остывание изделий в печи (в ряде случаев) и выгрузку.

В печах непрерывного действия изделия в процессе нагрева перемещаются от загрузочного конца печи к разгрузочному (с использованием транспортного механизма), изменение температуры изделий происходит вместе с их движением, при этом температура печи не изменяется со временем.

*По рабочей температуре* ЭПС подразделяются на *низкотемпературные* (до 700°C), *среднетемпературные* (от 700 до 1300°C) и *высокотемпературные* (свыше 1300°C).

В низкотемпературных печах теплообмен осуществляется преимущественно конвекцией или с существенным вкладом конвективной составляющей, в средне- и высокотемпературных – преимущественно излучением. Нагреватели низко- и среднетемпературных печей изготавливаются из сплавов сопротивления, в высокотемпературных печах с воздушной средой используются нагреватели из неметаллических материалов (карбид кремния, дисилицид молибдена, хромит лантана). Вакуумные печи на температуру свыше 1200°C требуют нагревателей из тугоплавких металлов, углеродных материалов или тугоплавких карбидов.

Помимо печей *с естественной воздушной средой* используются печи *с контролируемой атмосферой* (которая может быть *защитной*, защищающей нагреваемые материалы от окисления, или *активной*, используемой для термохимической обработки, например, цементации – науглероживания поверхностного слоя материала). Печи, давление в рабочем пространстве которых ниже атмосферного, носят название *вакуумных*; печи с давлением выше атмосферного называются *компрессионными*. Известны также печи, в которых изделие нагревается в жидкой среде (*жидкостные ванны*).

В отдельные классификационные группы выделяются установки инфракрасного нагрева, нагреватели жидкости и парогенераторы, а также различные устройства нагрева сопротивления специального назначения (например, для обогрева стекл оптических приборов, автомобилей или летательных аппаратов, антиобледенительные устройства в авиации, нагревательные кабели и пленочные нагреватели для устройства так называемых «теплых полов»).

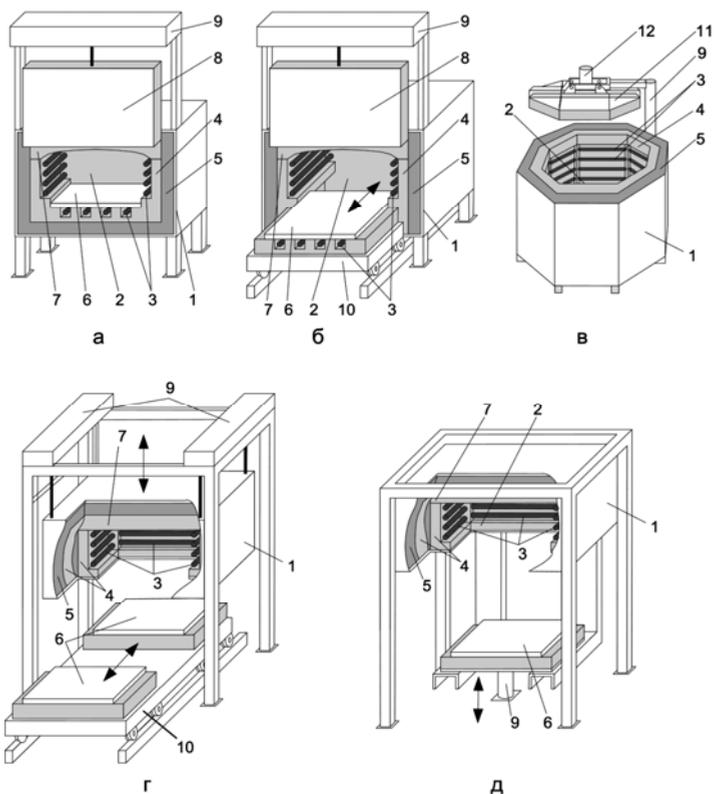
*Электрические печи сопротивления – наиболее распространенные электротермические установки. Их количество превышает 70% всех электротермических установок. Печи сопротивления используются практически во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и в быту. Примерами технологических процессов, реализуемых в ЭПС, могут служить: нагрев стальных изделий под термическую обработку (закалку, отжиг, отпуск, нормализацию); термохимическая обработка (цементация, азотирование, нитроцементация и др.); нагрев алюминиевых сплавов и пластмасс под пластическую деформацию; обжиг керамики; сушка и полимеризация лакокрасочных и иных покрытий, эмалирование; спекание из порошков, в том числе тугоплавких металлов и карбидов; термообработка изделий из тугоплавких металлов; пайка; рафинирование (очистка) различных материалов, возгонка, получение карбидов и т.п.; так называемый светлый (бескислородный) отжиг медных сплавов; плавка легкоплавких металлов и сплавов, магния, алюминия и их сплавов, а также малых объемов медных сплавов и чугуна; обогрев стекол оптических приборов, автомобилей, летательных аппаратов; обогрев людей и животных, жилых, производственных, сельскохозяйственных помещений; приготовление пищи, получение горячей воды и пара.*

В последнее время расширение диапазона рабочих температур ЭПС (до 3000°С и несколько выше), использование новых материалов в их конструкциях позволило освоить новые для ЭПС технологические процессы, такие, как нанесение защитных кремниевых покрытий на полимерные рулонные материалы (испарение и конденсация), процессы пиролиза (например, при уничтожении запасов химического оружия).

## **2.2. Типы и конструкции среднетемпературных печей сопротивления косвенного нагрева**

**Печи периодического действия** применяются в индивидуальном или мелкосерийном производстве. Их конструкции весьма разнообразны, наиболее распространены камерные, шахтные, колпаковые, элеваторные печи, печи с подвижным подом.

*Камерные печи сопротивления* (рис. 2.1а) весьма просты по конструкции и вместе с тем универсальны по назначению. Стены среднетемпературной камерной печи как минимум двухслойные (огнеупорный и теплоизоляционный слой). Огнеупорный слой кладки (футеровки) обычно складывается из кирпичей или блоков и образует рабочее пространство печи, несет на себе нагревательные элементы печи и нагреваемые изделия. Теплоизоляционный слой (в виде кирпичей, волокнистых материалов или засыпки) служит для уменьшения тепловых потерь.



**Рис. 2.1. Электрические печи сопротивления периодического действия:**  
**камерная (а); с выдвижным подом (б); шахтная (в);**  
**кошаковая (г); элеваторная (д)**

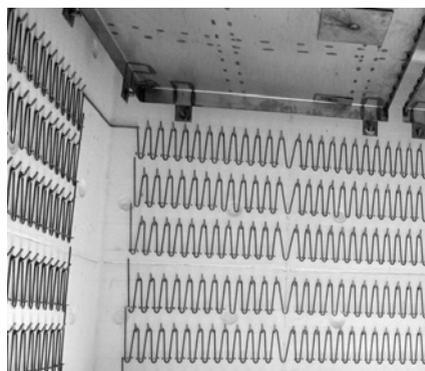
- 1 – корпус; 2 – рабочее пространство; 3 – нагреватели;  
 4 – огнеупорный слой футеровки; 5 – теплоизоляционный слой футеровки;  
 6 – подовая плита; 7 – свод; 8 – дверь; 9 – подъемный механизм;  
 10 – выдвижная тележка (под, стенд); 11 – крышка; 12 – вентилятор

В настоящее время в ЭПС довольно широко используются волокнистые огнеупорные материалы, например, муллитокремнеземистый рулонный войлок. При всех своих преимуществах (меньшая теплопроводность, меньшее аккумулярование тепла, звукоизоляция, демпфирование ударных механических нагрузок) такие материалы не могут сформировать несущую конструкцию печи, поэтому их использование требует наличия несущего каркаса (из жароупорных металлических материалов или состоящего из столбиков, выполненных из огнеупорного кирпича).

Нагреватели среднетемпературных, наиболее распространенных, ЭПС (рис. 2.2) изготавливаются из сплавов сопротивления в виде ленточного или проволочного зигзага (подвешиваются на внутреннюю поверхность футеровки на жароупорных крючках) или проволочной спирали (как правило, намотанной на керамическую трубку).



а



б

**Рис. 2.2. Нагреватели, применяемые в среднетемпературных печах сопротивления:** спирали из сплава сопротивления, намотанные на керамические трубки (а); зигзаги из сплава сопротивления, подвешенные на крючках (б)

Недостатком камерных печей (рис. 2.1а) является трудность загрузки и выгрузки изделий, осуществляемой через боковую дверцу печи. Для крупных изделий значительно более удобна загрузка сверху, реализуемая в *печах с выдвижным подом* и *колпаковых печах*.

Выдвижной под (рис. 2.1б) выполняется в виде футерованной тележки на рельсовом ходу, которая перемещается вместе с загруженными изделиями в камеру печи и обратно после осуществления нагрева. Нагреватели размещаются на стенках камеры и на выдвижном поду. Питание к подовым нагревателям подводится с использованием контактных устройств (штепсельных разъемов) или гибким кабелем. Выдвижные поды строятся с приводом от лебедки или самоходные.

Печи с выдвижным подом предназначены для термической обработки крупных изделий, их мощность достигает 3–5 МВт, объем рабочего пространства – нескольких десятков кубических метров.

*Шахтные печи* (рис. 2.1в) удобно применять для термической обработки протяженных изделий (валов, труб), возможна также термообработка мелких насыпных изделий, помещаемых в печь в жароупорной корзине. Рабочее пространство печи перекрывается сверху крышкой, которая имеет ручной, гидравлический, пневматический или электромеханический привод.

*Колпаковые печи* (рис. 2.1г) состоят из стенда (неподвижной части, несущей загрузку) и устанавливаемого на стенд колпака (подвижной части конструкции печи). Питание нагревателей колпака осуществляется через штепсельные разъемы, установленные в стенде и замыкающиеся при установке колпака на стенд. Как правило, процесс термообработки в колпаковых печах проводится в бескислородной атмосфере, для этого загрузка, установленная на стенд, накрывается тонкостенной жароупорной оболочкой (**муфелем**), подмуфельное пространство вакуумируется или заполняется защитным газом.

При эксплуатации ЭПС периодического действия целесообразно осуществлять остывание изделий после нагрева за пределами печи, поскольку при остывании в печи тепло, накопленное конструкцией печи в ходе нагрева, теряется бесполезно. Таким образом, рекомендуется выгружать изделия из печи сразу после окончания нагрева и выдержки, а в горячую печь немедленно загружать новое изделие, чтобы при его нагреве полезно расходовалось накопленное печью тепло. Однако при использовании защитной среды разгерметизировать рабочее пространство нельзя, пока изделия не остынут до 100–200°С, во избежание окисления изделий. В этом случае колпаковая печь позволяет решить вопрос рекуперации тепловой энергии, накопленной конструкцией печи. По окончании нагрева и выдержки горячий колпак переносится цеховым краном на другой стенд, где уже установлена новая загрузка, при нагреве которой будет использоваться накопленное колпаком тепло. Иногда для этих целей также используют выдвижной двух- или многопозиционный стенд, который показан на рис. 2.1г. На первом же стенде загрузка продолжает оставаться под герметичным муфелем, таким образом, ее остывание до необходимых температур происходит в защитной среде или вакууме.

При необходимости медленного охлаждения загрузки, в том числе контролируемого (с поддержанием заданной скорости охлаждения), после снятия нагревательного колпака вместо него устанавливается охладительный колпак с облегченной футеровкой, оснащенный вентиляторами, душем. Скорость охлаждения регулируется включением и выключением вентиляторов, подачей воды из душа на муфель.

*Элеваторные печи* (рис. 2.1д) похожи на колпаковые, только не колпак устанавливается на стенд, а стенд-тележка с загрузкой и муфелем поднимается под неподвижный колпак гидравлическим подъемником.

Таблица 2.1 содержит сведения о рабочей температуре и потерях холостого хода среднетемпературных ЭПС периодического действия различных конструктивных типов.

Под потерями холостого хода понимается мощность тепловых потерь печи, работающей в установившемся температурном режиме с пустым рабочим пространством (без загрузки).

**Рабочая температура и потери холостого хода  
среднетемпературных ЭПС  
периодического действия**

Тип печи	Максимальная рабочая температура, °С	Потери холостого хода, % от установленной мощности
Камерная	1300	25–40
С выдвижным подом	1300	до 50
Шахтная	1300	20–30
Колпаковая (в муфельном исполнении)	1100	15–20
Элеваторная	1250	15–20

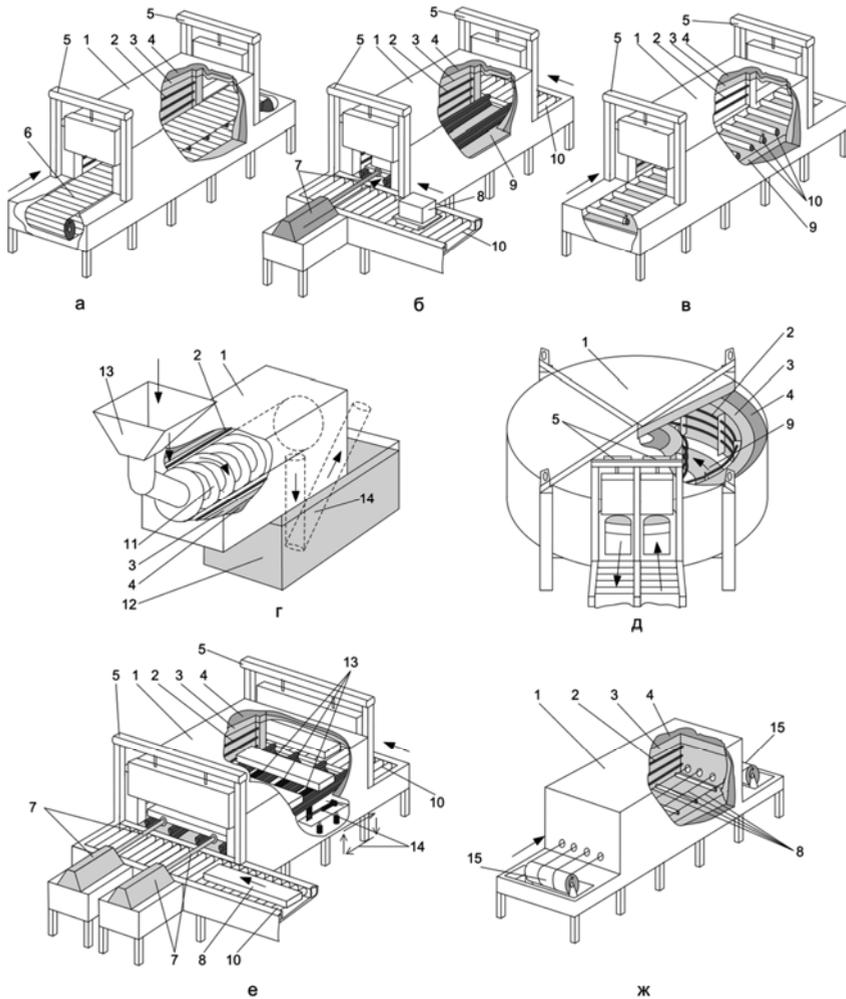
**Печи непрерывного действия** характерны тем, что изделия в процессе нагрева перемещаются от загрузочного проема к разгрузочному.

Печи непрерывного действия применяются при массовом поточном производстве, они легко встраиваются в поточные линии и технологические агрегаты (например, агрегат для закалки стальных изделий включает в себя печь для нагрева под закалку, закалочную ванну с механизмами для загрузки и выгрузки изделий, моечную машину, сушильную установку, отпускную печь).

Печи непрерывного действия, как правило, выполняются многозонными. Под **тепловой зоной** понимается часть рабочего пространства печи, в которой осуществляется самостоятельное регулирование температуры. Каждая зона оснащается своим датчиком температуры и отдельным исполнительным устройством (регулятором мощности). Тепловые зоны выделяются также в крупных печах периодического действия размером рабочего пространства более 2,5 м по горизонтали или более 1,5 м по вертикали. Регулирование температуры по зонам применяется в крупных печах, поскольку условия теплообмена в разных частях рабочего пространства в таких печах различаются, и обеспечить необходимую точность поддержания температуры во времени и равномерность температурного поля в пространстве с использованием единственного регулятора невозможно.

Печи непрерывного действия (рис. 2.3) имеют различные конструктивные исполнения, различающиеся видом механизма, перемещающего нагреваемые изделия по рабочему пространству.

В *конвейерных печах* (рис. 2.3а) для перемещения загрузки служит конвейерная лента из жаропрочного материала. Конвейерная лента может иметь различные конструктивные исполнения: сетчатая – плетеная из проволоки; или панцирная, применяемая при более массивной загрузке, собранная из подвижно соединенных между собой штампованных или литых звеньев (подобно гусенице танка, отсюда и название «панцирная»).



**Рис. 2.3. Электрические печи сопротивления непрерывного действия:**  
**конвейерная (а); толкательная (б); рольганговая (в); барабанная (г);**  
**карусельная (д); печь с шагающим подом (е); протяжная (ж)**  
 1 – корпус; 2 – нагреватели; 3 – огнеупор; 4 – теплоизоляция;  
 5 – дверь с подъемным механизмом; 6 – конвейер; 7 – толкатель;  
 8 – изделие; 9 – под; 10 – рольганг; 11 – барабан; 12 – закалочный бак;  
 13 – шагающие балки; 14 – привод шагающих балок и схема их перемещения;  
 15 – катушки с проволокой

Конвейерная лента натянута на барабаны, один из которых – ведущий, связанный через приводной механизм с электродвигателем. В настоящее время наиболее часто используется частотно-регулируемый привод с асинхронным двигателем. Возможность регулировать частоту вращения ведущего барабана, а значит, и скорость движения ленты позволяет подстроить режим работы печи под изменение требований технологического процесса.

Чтобы конвейерная лента не провисала из-за ее удлинения в процессе работы печи, используется специальное устройство – натяжная станция со стороны ведомого барабана. При длине рабочего пространства более 4–5 м дополнительно используются ролики, поддерживающие конвейерную ленту.

В конвейерных печах с защитной атмосферой барабаны размещаются внутри рабочей камеры, в связи с чем уменьшаются тепловые потери печи, но при этом усложняется ремонт конвейера, а валы барабанов требуют водяного охлаждения, что усложняет конструкцию печи.

В печах с воздушной средой барабаны вынесены за пределы печи, при этом потери тепла больше, поскольку конвейерная лента частично проходит за пределами печи, зато существенно упрощается ремонт конвейера.

При необходимости медленного охлаждения изделий в печи в конвейерных печах, как и в других печах непрерывного действия, выделяют специальную зону охлаждения с облегченной футеровкой.

Конвейерные печи применяются для различных видов термообработки (закалка, отпуск, отжиг) небольших изделий из черных и цветных металлов, пайки медными припоями, сушки. *Температура ограничивается прочностью конвейерной ленты и обычно не превышает 900–1000°C, при мелкой загрузке в защитной среде допускается до 1200°C.*

В толкательной печи (рис. 2.3б) изделия периодически проталкиваются по направляющим (рельсам, иногда роликам) специальным толкательным механизмом, находящимся перед загрузочным проемом печи. Крупные изделия правильной прямоугольной формы перемещаются по направляющим непосредственно, образуя в печи «поезд» из изделий. Мелкие или имеющие сложную форму изделия перемещаются в жароупорных поддонах (ящиках). Толкатель имеет электромеханический или гидравлический привод.

Толкательные печи применяются *при температурах до 1200°C* для отжига, нормализации, закалки и цементации стальных изделий, для термической обработки изделий из чугуна и цветных металлов.

Разновидностью толкательных печей являются *ручьевые печи*, в которых сравнительно небольшие изделия (как правило, цилиндрической формы) проталкиваются по узким лоткам-ручьям, изготовленным из жароупора или керамики. Ручьевые печи, в частности, используются для закалки колец подшипников.

В *рольганговых печах* (рис. 2.3 в) перемещение изделий осуществляется вращением жароупорных роликов, размещенных в поду печи. Концы роликов выводятся через отверстия в футеровке за пределы печи и устанавливаются в водоохлаждаемые опоры. Привод роликового конвейера (рольганга) осуществляется, как правило, асинхронным двигателем.

Рольганговые печи применяют для термообработки листового проката, труб, длинномерных изделий, обжига керамической плитки. Их рабочая температура ограничивается стойкостью жароупорных материалов, из которых изготовлены ролики (*до 1150°C*).

Перемещение изделий в *барабанных печах* (рис. 2.3г) осуществляется в полости вращающегося барабана из жаропрочной стали. Внутри барабана имеются ребра, образующие винтовую поверхность (*архимедову спираль*), благодаря которой изделия при вращении барабана перемещаются от загрузочного конца к разгрузочному. Барабанная печь предназначена для термообработки (чаще всего закалки) мелких стальных изделий *при температуре до 1000°С*. Важно, чтобы изделия имели округлую, без острых кромок форму (ролики, шарики, мелкие кольца и др.), чтобы не повредить поверхность барабана. В установках барабанных печей для закалки непосредственно под камерой печи размещается закалочный бак, в который падают из окон, прорезанных в барабане, закаливаемые детали. Из закалочного бака изделия извлекаются шнеком.

Из-за ограниченной нагрузочной способности барабана при рабочих температурах (900–1000°С) длина рабочей части барабана в печах для термообработки стальных изделий, как правило, не превышает 3–3,5 м. Длина барабанов в печах для обжига цементного клинкера может достигать 15 м и более, поскольку загрузка в этом случае очень легкая, а температура ниже.

*Карусельные печи* (рис. 2.3д) имеют кольцевой вращающийся под, изготовленный из огнеупорного материала. Загрузка, помещенная на вращающийся под через загрузочный проем, нагревается и, совершив почти полный оборот, выгружается через разгрузочный проем.

В *печах с шагающим подом* (рис. 2.3е) перемещение загрузки осуществляется шагами – циклическим движением футерованной балки, являющейся подвижной частью пода печи и проходящей по всей длине рабочего пространства. Балка поднимается вверх, подхватывая опиравшуюся краями на неподвижную часть пода загрузку, переносит ее вперед в сторону разгрузочного проема на определенное расстояние (шаг), затем движется вниз, опускает загрузку на неподвижную часть пода и возвращается в исходное положение, двигаясь ниже уровня пода. Используется электромеханический или гидравлический привод шагающей балки.

В печах с шагающим подом и карусельных все металлические (жароупорные) детали пода и механизма перемещения вынесены за пределы горячей зоны, поэтому температура печи практически ограничивается только стойкостью материала нагревателей (для безникелевых сплавов сопротивления – до 1300°С). Такие печи широко используются для спекания из порошков, обжига керамики.

Наиболее массивные изделия могут подвергаться термообработке в *туннельных печах*. В таких печах изделия перемещаются на футерованных тележках,двигающихся по рельсовому пути.

*Протяжные печи* (рис. 2.3ж) предназначены для термообработки (главным образом, отжига) проволоки и ленты из черных и цветных металлов, в том числе в защитной среде. В зависимости от направления протяжки проволоки (ленты)

протяжные печи делятся на вертикальные и горизонтальные. Наиболее крупные вертикальные многопетлевые (проволока или лента движется зигзагом) протяжные печи носят название башенных, их производительность достигает 60 т/ч при скорости протяжки до 600 м/мин. Мощность башенных печей составляет сотни и тысячи киловатт.

### **2.3. Особенности конструкции низкотемпературных и высокотемпературных печей**

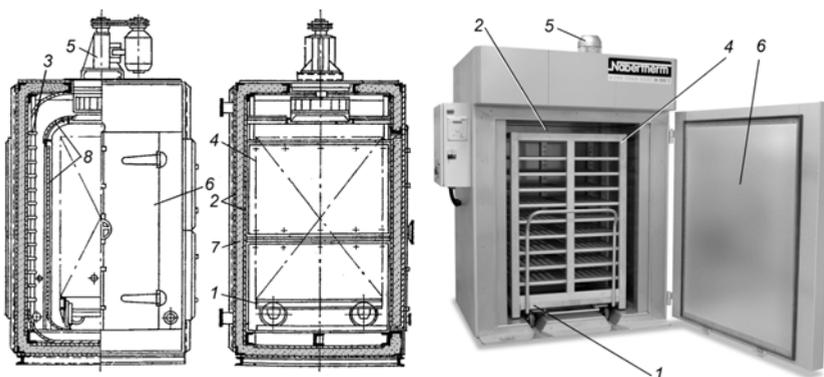
*Низкотемпературные печи сопротивления* (температура до 700°C) применяются для нагрева заготовок из алюминиевых сплавов и пластмасс под пластическую деформацию и термообработку, сушки и полимеризации лакокрасочных и порошковых покрытий, пайки и других технологических процессов. В низкотемпературных печах тепло передается нагреваемым изделиям преимущественно конвекцией.

Простейшими являются печи с естественной конвекцией. Они представляют собой шкаф или камеру с расположенными на стенках изделиями и с нагревателями, установленными в поду и на боковых стенках. Если печь (шкаф) используется для сушки, то для удаления влаги из рабочего пространства в днище шкафа и в его верхней части устраиваются отверстия, благодаря которым в шкафу устанавливается сквозная тяга воздуха.

Печи с естественной конвекцией имеют малую производительность. Чтобы увеличить производительность, необходимо интенсифицировать конвективный теплообмен, для чего в конструкции печей предусматриваются вентиляторы, обеспечивающие принудительную циркуляцию атмосферы. Чем больше скорость потока, обтекающего загрузку, тем выше коэффициент теплоотдачи конвекцией и, следовательно, выше скорость нагрева изделий и производительность печи. Однако ряд технологических процессов накладывают ограничения на скорость потока, например, при сушке лакокрасочных покрытий скорость потока не должна превышать 3–4 м/с, иначе покрытие станет неровным (возникнут «волны»).

Футеровка печей на температуру до 400°C, как правило, однослойная, выполняется из теплоизоляционного материала.

На рисунке 2.4 представлен пример конструкции низкотемпературной печи. Печь имеет стальной каркас с двойной стальной обшивкой (внутренняя обшивка, как правило, изготавливается из нержавеющей стали, однако применение жароупоров при температурах ниже 400°C излишне). Пространство между обшивками заполняется легкой теплоизоляцией, например, шлаковой или минеральной ватой.



**Рис. 2.4. Низкотемпературная печь сопротивления (сушильная камера):**

- 1 – тележка, 2 – стальная обшивка; 3 – нагреватели; 4 – сушильная камера;  
 5 – вентилятор с электродвигателем; 6 – дверь; 7 – теплоизоляция;  
 8 – стальные экраны

В верхней части рабочего пространства устанавливается вентилятор (при большой длине рабочего пространства – несколько вентиляторов), который гонит воздух вниз по боковому каналу, образованному стенкой печи и стальным экраном, при этом воздух подогревается, обтекая установленные в канале нагреватели. *Экраны не только формируют канал для воздушного потока, но и защищают загрузку от прямого излучения нагревателей.* Дело в том, что в низкотемпературных печах излучательная составляющая теплопередачи невелика по сравнению с конвективной и не может существенно увеличить интенсивность нагрева, однако способна вызвать местные перегревы у изделий сложной формы, т.е. ухудшить равномерность температурного поля, поэтому в таких печах излучение, по сути, является вредным. Нагретый воздух поступает в нижнюю часть печи и затем поднимается кверху, проходя через загрузку, установленную на тележку с решетчатой платформой. Прошедший через загрузку воздух снова засасывается вентилятором и поступает в боковой канал с нагревателями, таким образом, организуется круговая циркуляция (рециркуляция) воздуха. С точки зрения энергетической эффективности лучше, если печь работает с полной рециркуляцией, т.е. без выброса нагретого воздуха из печи и подачи холодного воздуха извне, поскольку с воздухом, выбрасываемым из печи, теряется большое количество теплоты. Однако в сушильных печах полная рециркуляция неприменима, поскольку не обеспечивает удаления влаги из рабочего пространства. В этом случае организуется смешанная циркуляция, при которой часть воздуха засасывается вентилятором из печи, а часть – из помещения.

Для более высоких температур (400–700°C) футеровка печи выполняется двухслойной, состоит из огнеупорного и теплоизоляционного слоев, как в среднетемпературных печах.

Печи с принудительной циркуляцией атмосферы по конструктивному исполнению бывают камерными, с выдвижным подом, шахтными. Используются также конвейерные, толкательные, протяжные низкотемпературные печи непрерывного действия.

Если требуется обеспечить высокую равномерность температурного поля в камере печи, а сечение камеры при этом велико, то добиться требуемой равномерности при размещении вентилятора и нагревателей в самой камере затруднительно. В таких случаях нагреватели и вентилятор выносят за пределы печи, нагреватели размещаются в отдельной камере, называемой **выносным калорифером**. Вентилятор прогоняет воздух через калорифер и направляет в печь по нескольким каналам. Сечение каналов регулируется заслонками таким образом, чтобы обеспечить наибольшую равномерность температурного поля в камере печи. Как правило, печи с выносным калорифером выполняются с рециркуляцией.

Преимуществом печей с выносным калорифером является возможность использовать мощный вентилятор и, следовательно, обеспечить большие скорости воздушного потока и высокие значения коэффициента теплоотдачи. Кроме того, такие печи удобнее в ремонте. Однако увеличение теплоотдающих поверхностей (воздуховоды, калорифер) приводит к росту тепловых потерь.

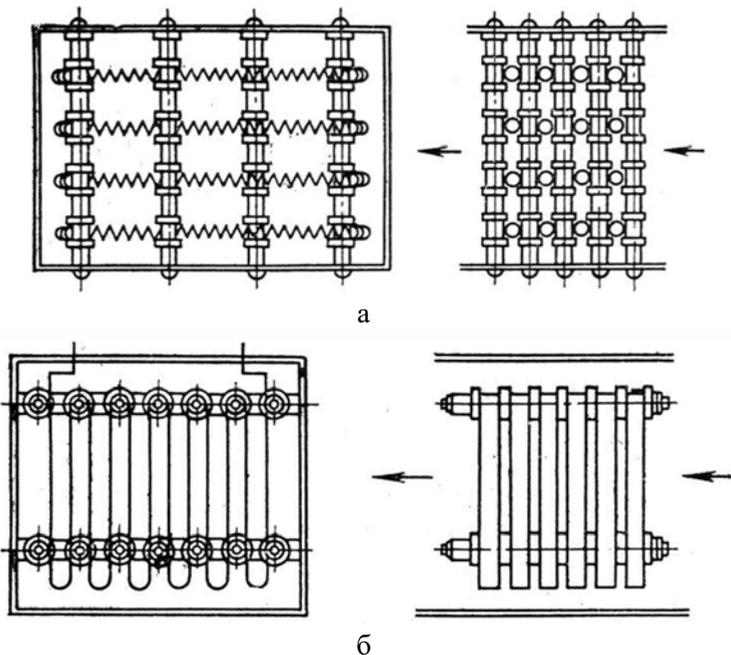
Нагреватели, встроенные в печь, обычно выполняются в виде спиралей из сплава сопротивления, намотанных на горизонтально расположенные керамические трубки. В сушильных печах не используют нагреватели из безникелевых сплавов, поскольку они, в отличие от нихромов, ржавеют под действием влаги. В выносных калориферах часто используются нагреватели в виде свободно обдуваемых зигзагов или спиралей, зажатых между изоляторами через определенные интервалы или привязанных к изоляторам (рис. 2.5). В этом случае нагреватели размещаются поперек потока в несколько рядов.

Довольно широко в низкотемпературных печах применяются **трубчатые электронагреватели (ТЭН)**. ТЭН (рис. 2.6) состоит из оболочки (трубки из стали, медного или алюминиевого сплава), по оси которой расположена нихромовая спираль, приваренная к выходным болтам у концов нагревателя. Пространство между спиралью и стенками трубы заполняется периклазом – окисью магния, обладающей хорошей электроизоляционной способностью и одновременно достаточно высокой теплопроводностью. Края трубки герметизируются выводными изоляторами. ТЭН, заполненный периклазом, может быть изогнут любым образом, и ему придается удобная форма.

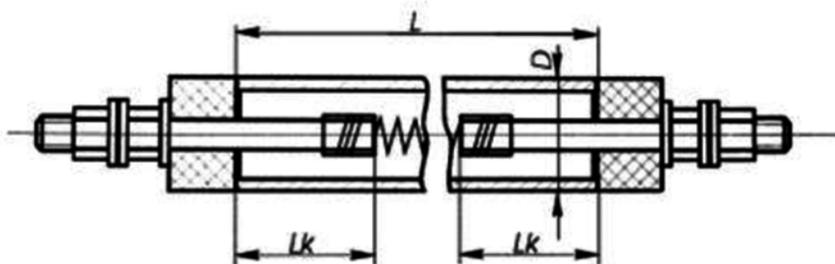
Достоинствами ТЭН являются:

- очень большой срок службы благодаря тому, что периклазовая засыпка изолирует нихромовую спираль от воздействия атмосферного воздуха и агрессивных сред;

- удобство монтажа и присоединения токоподводов, простота замены нагревателя при перегорании.



**Рис. 2.5. Свободно обдуваемые спиралеобразные (а) и зигзагообразные (б) нагреватели калориферов**



**Рис. 2.6. Трубчатый электронагреватель**  
 $D$  – диаметр оболочки;  $L$  – развернутая длина ТЭН;  
 $L_k$  – длина контактного стержня в заделке

ТЭН представляют собой готовые заводские изделия. Они выпускаются на различную температуру, разной мощности (от десятков ватт до десятков киловатт), длины (от нескольких сантиметров до 6 м) и конфигурации (как прямые, так и изогнутые в различных плоскостях), на разное рабочее напряжение (от 12 до 660 В). Разные серии ТЭН предназначены для работы в спокойной воздушной среде, в движущейся воздушной среде при определенной скорости воздушного потока, в воде, в кислой или щелочной среде и т.д. У оребренных ТЭН развитая теплоотдающая поверхность обеспечивает существенное улучшение теплоотдачи воздуху.

*Высокотемпературные печи с воздушной средой* рассчитаны на температуры 1300–1800°C. Нагреватели таких печей представляют собой готовые изделия из неметаллических материалов (карбид кремния, дисилицид молибдена, хромит лантана). Стержневой нагреватель из неметаллического материала представлен на рис. 2.7а. Концевые участки таких нагревателей выполняются утолщенными, их сечение в 6–8 раз больше, чем у активной (средней) части, поэтому тепловыделение концевых участков и, следовательно, их температура при работе меньше, чем у активной части. Это дает возможность отказаться от водяного охлаждения контактов. Дополнительно для уменьшения тепловыделения концевых частей их материал легируют добавками, снижающими удельное электрическое сопротивление (например, металлическим кремнием). Поверхность концевых участков нагревателя имеет серебряное или алюминиевое покрытие, обеспечивающее минимальное сопротивление контакта с внешним токоподводом.



а



б

**Рис. 2.7. Высокотемпературные нагреватели с утолщенными токовыводами: стержневые (а); U-образный (б)**

Высокотемпературные печи периодического действия обычно выполняются камерного типа. Они отличаются от среднетемпературных печей более толстой футеровкой, состоящей, как минимум, из трех слоев. Внутренний огнеупорный

слой выполняется из высокоглиноземистых огнеупоров (корунд и др.) или карборунда, между этим слоем и теплоизоляцией помещается промежуточный слой из шамота-легковеса или волокнистого огнеупора.

Нагреватели высокотемпературных печей, особенно выполненные из карбида кремния и хромита лантана, отличаются низкой термостойкостью, поэтому внесение холодного изделия в разогретую камеру печи, приводящее к термоудару (резкому снижению температуры нагревателей), может вызвать растрескивание нагревателей.

Решить эту проблему позволяют печи с двумя камерами – камерой подогрева с нагревателями из сплава сопротивления на 850–900°C и основной высокотемпературной камерой нагрева с неметаллическими нагревателями. Как правило, камера подогрева размещается под основной камерой, по окончании подогрева подовая плита с изделиями перемещается в основную камеру гидравлическим или пневматическим подъемником. Предварительный подогрев изделий позволяет исключить термоудары, облегчая тем самым условия работы высокотемпературных нагревателей.

В ряде случаев используются высокотемпературные печи непрерывного действия (толкательные с керамическими или карборундовыми поддонами, карусельные, с шагающим подом).

## **2.4. Вакуумные электропечи сопротивления и печи с контролируемой атмосферой**

Контролируемой атмосферой называется любая среда, отличная от воздушной. Контролируемые атмосферы подразделяются на *защитные* и *специальные* (или *активные*). Защитные атмосферы позволяют проводить нагрев в бескислородной среде, чтобы избежать окисления поверхности нагреваемых изделий (образования окалины). В специальных средах проводят термохимическую обработку (цементацию, азотирование, нитроцементацию).

Основные требования к защитной атмосфере – практически полное отсутствие свободного кислорода (содержание менее 0,0001%) и двуокиси серы SO<sub>2</sub>. При термообработке стали важно минимальное содержание паров воды, поскольку они обезуглероживают сталь (при термообработке высокоуглеродистых сталей допустимое содержание влаги в защитном газе составляет 0,05%, низкоуглеродистых – 2%). Обезуглероживание стали происходит также при малом соотношении содержания углекислого газа CO<sub>2</sub> к угарному газу CO в защитной смеси, при большом соотношении CO<sub>2</sub>:CO, наоборот, имеет место науглероживание (критическое значение соотношения концентраций CO<sub>2</sub>:CO, при котором происходит переход от обезуглероживания к науглероживанию, зависит от марки стали и температуры). Аналогично влияет на обезуглероживание и науглероживание стали соотношение H<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub>.

Рассмотрим примеры контролируемых атмосфер, используемых в ЭПС.

*Чистый водород* защищает материалы от окисления, но сильно обезуглероживает стали, поэтому может применяться только для низкоуглеродистых сплавов. Широко применяется в порошковой металлургии, при нагреве химически активных металлов (цирконий, вольфрам, молибден), электротехнических и магнитных сплавов. Медные сплавы в водороде не отжигают (поскольку при нагреве в водороде они становятся хрупкими). Наличие СО при отжиге медных сплавов желательно.

При использовании водородной среды необходимо строго соблюдать нормы пожаровзрывобезопасности.

Чистые *инертные газы* (аргон), чистый *азот* дороги, они используются в ответственных технологических процессах, в частности, в аргоне можно осуществлять термообработку тугоплавких металлов и композиционных материалов при температурах до 3000°C.

Наиболее часто в электротермии используются такие защитные газовые среды, которые относительно несложно получить в специальных газоприготовительных установках, размещаемых в непосредственной близости от печей. К таким средам относятся диссоциированный аммиак, эндогаз и экзогаз.

*Диссоциированный аммиак* используют в порошковой металлургии, а также для отжига и иной термообработки малоуглеродистых сталей. Высокоуглеродистые стали он обезуглероживает.

Получают диссоциированный аммиак разложением аммиака  $\text{NH}_3$  на азот и водород в реакторе, подогретом до 600–650°C, с катализатором – железной стружкой, с последующим выжиганием водорода в камере сжигания, очисткой от паров воды, примесей углекислоты и сернистых газов. Получается газовая смесь в составе 75–99% азота, 1–25% водорода, которая и подается в печи.

Близок по составу к диссоциированному аммиаку (содержит порядка 95% азота), но дешевле в получении *экзогаз*, получаемый сжиганием природного газа в смеси с воздухом, причем соотношение воздуха и природного газа по массе составляет 0,6–0,95. После камеры сжигания смесь, насыщенная азотом из воздуха, очищается от влаги, избытка углекислоты и угарного газа. Подаваемый в печи защитный газ содержит 85–95% азота, 4–10% водорода, 0,05–0,5%  $\text{CO}_2$ , 0,1–3,5% СО. Экзогаз используется для *светлого* (т.е. бескислородного) отжига латуни и иных медных сплавов, термообработки малоуглеродистых сталей.

*Эндогаз*, в отличие от экзогаза, получают не сжиганием, а медленным окислением природного газа в смеси с воздухом (соотношение воздуха и газа 0,25–0,35) в реакторе, подогретом до 1000°C, в присутствии никелевого катализатора. Этот процесс, в отличие от сжигания, является эндотермическим (происходит с поглощением энергии), поэтому эндогаз дороже в получении, чем

экзогаз. Состав эндогаза: 18–20% CO, 38–40% H<sub>2</sub>, 39% N<sub>2</sub>, менее 1% CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>. Эндогаз применяется для термообработки средне- и высокоуглеродистых сталей, закалке легированных сталей. Он также может использоваться как цементационная среда (наряду с метаном), поскольку обладает науглероживающей способностью. В отличие от экзогаза, эндогаз взрывоопасен (из-за значительного содержания водорода и угарного газа) и токсичен.

При использовании контролируемых атмосфер в печах необходимы специальные меры по герметизации рабочего пространства, чтобы не допустить смешивания контролируемой среды с кислородом воздуха и потери ее свойств. В частности, используются пламенные завесы (газовые горелки, установленные в загрузочном и разгрузочном проемах печи, сжигающие кислород и препятствующие тем самым его проникновению в рабочее пространство). В печах непрерывного действия, работающих, как правило, с открытыми загрузочным и разгрузочным проемами, пламенные завесы горят постоянно, в печах периодического действия они включаются на время загрузки и разгрузки печи.

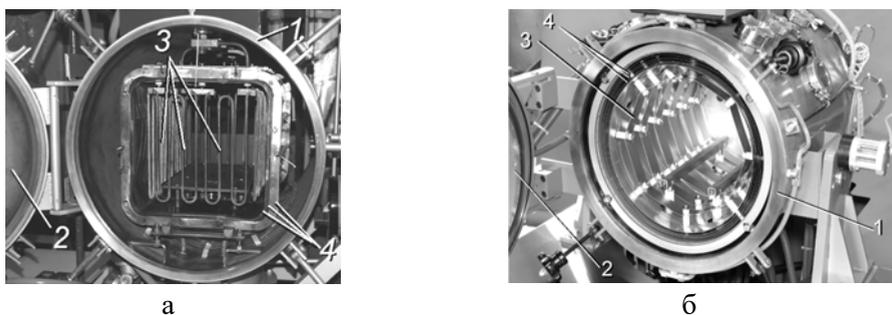
Надежным средством герметизации печи является использование песчаных или жидкостных (гидравлических) затворов. Для того чтобы воспрепятствовать проникновению воздуха в печь, защитный газ подается в печь при небольшом избыточном давлении. Поэтому (особенно в печах непрерывного действия) неизбежно проникновение защитного газа в помещение цеха, вследствие чего в цеху необходимо организовать эффективную вытяжную вентиляцию, особенно если газ является взрывоопасным и/или токсичным (например, эндогаз). Горючий газ должен дожигаться на выходе из вентиляционной системы цеха на улицу. Конструкция перекрытий цеха должна выполняться таким образом (плоский потолок), чтобы не образовывалось застойных зон (мешков), в которых могли бы скапливаться более легкие по сравнению с воздухом газы, например, водород. В цеху устанавливаются газоанализаторы для контроля содержания вредных и опасных веществ.

Отметим, что *газовая смесь является взрывоопасной при содержании водорода от 4 до 74% или угарного газа CO от 12,5 до 74%*. Особо тщательно меры взрывобезопасности, разумеется, нужно соблюдать при работе с чистым водородом.

Опасно заполнение *холодной* печи горючим газом (например, эндогазом), поскольку газ смешивается с воздухом, что может привести к образованию взрывоопасной смеси. Поэтому горючим газом заполняют печь, уже разогретую выше температуры самовоспламенения газа (750°C), при этом поступающий в печь газ будет немедленно сгорать, пока в печи есть свободный кислород. Можно также перед заполнением горючим газом продувать печь аргоном, азотом или углекислотой (из баллонов).

При работе с инертными газами (аргон) необходимо помнить, что они не токсичны, однако существенно тяжелее воздуха, поэтому в случае утечек вытесняют воздух из нижней части помещений и вызывают кислородное голодание. Особенно опасны утечки аргона в подвальные помещения. Важно, что инертные газы не имеют ни цвета, ни запаха, поэтому их утечку трудно своевременно распознать.

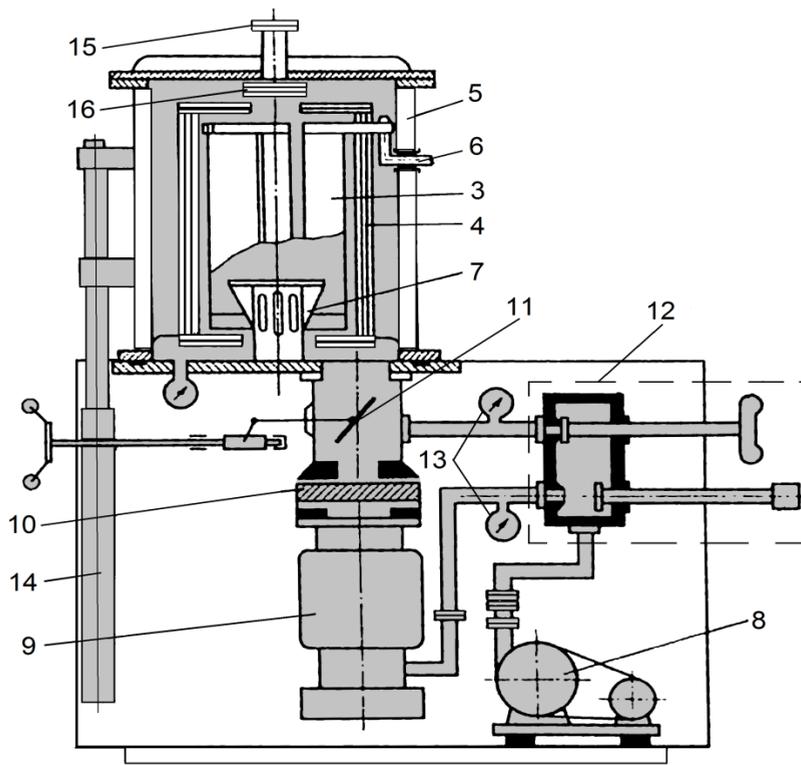
Многие ответственные технологические процессы проводятся в *вакуумных печах сопротивления*, давление в рабочем пространстве которых ниже атмосферного (рис. 2.8, 2.9). Давление в рабочем пространстве вакуумных печей может составлять менее  $10^{-3}$  мм. рт. ст. или  $1,3 \cdot 10^{-5}$  Па (высоковакуумные печи) и даже менее  $10^{-7}$  мм. рт. ст. (сверхвысоковакуумные печи), что на несколько порядков ниже, чем давление в космическом пространстве на высоте 300–400 км (на околоземной орбите). Вакуум в печах создается специальными вакуумными насосами.



**Рис. 2.8. Вакуумные печи сопротивления:**  
камерная (ООО «Элтертехникс», РФ) (а),  
печь с поворотной вакуумной камерой  
(компания T-M Vacuum technologies, США) (б)

К вакуумным печам относятся также печи, которые после вакуумирования заполняются защитным газом (аргон, водород).

При температуре выше  $1700^{\circ}\text{C}$  и (или) давлении  $10^{-3}$  мм. рт. ст. и ниже использование керамической футеровки вакуумных печей невозможно, поскольку в этих условиях керамические материалы интенсивно испаряются и загрязняют нагреваемые изделия. В таких печах (высокотемпературных и высоковакуумных) используется либо теплоизоляция из углеродных материалов (графит, углеродные композиты), либо металлическая экранная теплоизоляция (несколько параллельно расположенных тонких металлических листов, желательны полированные, препятствующих тепловому излучению и тем самым снижающих потери тепла). При температурах до  $1150^{\circ}\text{C}$  экраны изготавливаются из жароупоров, до  $1700^{\circ}\text{C}$  – из молибдена, при более высоких температурах – из вольфрама. Герметичный корпус вакуумной печи выполняется водоохлаждаемым. Наиболее часто используются печи камерного (рис. 2.8), шахтного, колпакового (рис. 2.9) типов.

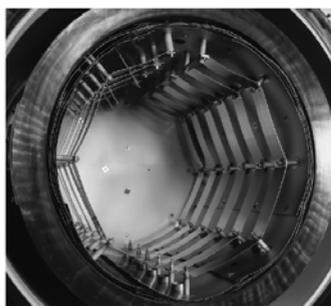


**Рис. 2.9. Вакуумная печь сопротивления колпакового типа (схема):**

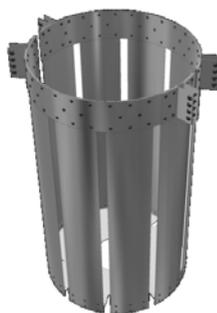
- 1 – водоохлаждаемая вакуумная камера; 2 – дверь с вакуумным уплотнением;
- 3 – нагреватели; 4 – металлическая экранная теплоизоляция;
- 5 – водоохлаждаемый колпак; 6 – токоподводы с водяным охлаждением;
- 7 – столик для изделий; 8 – механический насос; 9 – диффузионный насос;
- 10 – азотная ловушка; 11 – вакуумный затвор; 12 – блок вакуумных клапанов;
- 13 – датчики остаточного давления (манометрические преобразователи);
- 14 – гидропривод подъема колпака; 15 – смотровое окно; 16 – защитная задвижка

В вакуумных печах сопротивления на температуры до 1200°C используются нагреватели из нихрома, как правило, в виде ленточного или проволочного зигзага, аналогичные тем, которые применяются в среднетемпературных печах с воздушной средой.

Нагреватели из молибдена или вольфрамово-молибденового сплава МВ-30 применяются при температурах до 1700°C в вакууме и до 2200°C в чистой защитной среде (аргон). Такие нагреватели изготавливаются либо в виде проволочного зигзага (рис. 2.8а), либо в виде листа, либо в виде пластин, подвешиваемых на стержнях, проходящих через отверстия в экранной теплоизоляции и закрепленных на водоохлаждаемом кожухе печи с помощью изоляторов (рис. 2.8б, рис. 2.10а).



а



б



в



г

**Рис. 2.10. Металлические нагреватели вакуумных печей:**  
ленточные (а), листовые (б), сетчатые (в), стержневые (г)

Нагреватели из вольфрама способны работать при чрезвычайно высоких температурах (до 2400°C в вакууме, до 3000°C в чистой инертной среде). Такие нагреватели обычно выполняются в виде цилиндров (сплошных или состоящих из отдельных прутков или проволочек – так называемая «беличья клетка»), внутрь которых помещается загрузка печи (рис. 2.10б, 2.10в, 2.10г). Такое решение позволяет достичь высокой равномерности температурного поля.

Также распространены вакуумные печи, нагреватели, теплоизоляция и другие элементы конструкции которых изготавливаются из углеродных материалов, в частности, графита. Печи с нагревателями и теплоизоляцией из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) способны работать при температурах до 3000°C и несколько выше (в инертной среде). В таких печах могут реализовываться новые для печей сопротивления технологические процессы, например, нанесение кремниевых покрытий на полимерные рулонные материалы (изготовление теплоизоляции космических аппаратов), ранее реализуемое только в установках электронно-лучевого нагрева, высокотемпературные процессы пиролиза (в частности, при ликвидации запасов химического оружия).

Нагреватели вакуумных печей сопротивления, как правило, рассчитываются на пониженное относительно сетевого (380/220 В) напряжение, поэтому в систему питания включается понижающий трансформатор.

## **2.5. Плавильные печи сопротивления, жидкостные ванны и печи спсевдокипящим слоем**

Из-за имеющихся ограничений по рабочей температуре, определяемых стойкостью нагревателей, и относительно малой по сравнению с другими видами электронагрева (индукционным, дуговым, плазменным, электронно-лучевым) концентрации мощности печи сопротивления не могут применяться для плавки металлов и сплавов со значительной температурой плавления (например, сталей и тугоплавких металлов). Однако в **плавильных печах сопротивления** может осуществляться плавка металлов и сплавов с относительно низкой температурой плавления, таких, как олово, свинец, цинк, баббит, магниевые сплавы, алюминий и алюминиевые сплавы, а также небольших объемов медных сплавов и чугуна.

Плавка металлов и сплавов с температурой плавления не выше 500°C (олово, свинец, цинк, баббит и др.) может осуществляться в литой или сварной стальной или чугунной ванне, установленной в обычную печь камерного или шахтного типа. Также для плавки таких металлов и сплавов может использоваться ванна с внутренним обогревом, в которой источником тепла служат трубчатые электронагреватели, расположенные у поверхности расплава (ниже верхних краев стенок ванны). КПД ванн с внутренним обогревом несколько выше, кроме того, они более компактны.

Магниевые сплавы, применяемые в авиастроении, ракетной технике, для изготовления различных деталей (например, колесных дисков) транспортных машин, плавят в печах шахтного типа в узких высоких тиглях из жароупорной стали. Такая форма тигля (с малым диаметром) определяется желанием уменьшить до минимума поверхность контакта расплава с воздухом, поскольку магний сильно окисляется на воздухе. Температура плавления большинства магниевых сплавов лежит в пределах 600–650°C.

В отличие от магния, для плавки алюминия и алюминиевых сплавов применяются, наоборот, печи с большой площадью поверхности расплава, так как это облегчает удаление из металла содержащихся в нем газов при плавке. Обычно используют печи ванного типа, в которых металл расплавляется непосредственно в футеровке (изготовленной из шамотной набивной массы). Для обеспечения слива металла после плавки конструкцию печи выполняют наклоняющейся. Печи емкостью до 1,5 т используются обычно для получения фасонного алюминиевого литья, более крупные печи применяют для переплавки электролизного алюминия на слитки.

Главной проблемой при плавке алюминия в ЭПС является низкая стойкость нихромовых нагревателей под воздействием паров и брызг алюминия. Кроме того, алюминий, являясь металлом с малой степенью черноты, отражает значительную долю энергии излучения нагревателей, вследствие чего разность температуры нагревателей и металла составляет 300°С и более, и нагреватели работают при температуре порядка 1100°С, близкой к предельной для нихрома, что еще больше сокращает срок их службы. Использование же нагревателей из более жаростойких железохромоалюминиевых сплавов невозможно, поскольку они еще менее стойки к воздействию паров и брызг алюминия.

Из-за малого срока службы нагревателей ЭПС используются для плавки алюминия и его сплавов все реже, вытесняясь индукционными печами и, в ряде случаев, дуговыми печами постоянного тока. Тем не менее, ряд предприятий продолжают производить и успешно реализовывать ЭПС для плавки и миксирования (выдержки и перемешивания расплава перед разливкой) алюминиевых сплавов. Так, ООО «НПЦ магнитной гидродинамики» (Красноярск) поставляет крупные (до 70 т) миксеры сопротивления. Нагреватели таких печей-миксеров выполнены в виде **радиационных труб** (собственно проволочный нагреватель из сплава сопротивления размещается внутри трубы, изготовленной из жароупорного сплава), что предотвращает непосредственное воздействие паров и брызг алюминия на материал нагревателя. Печь-миксер также оснащается системой магнитогидродинамического перемешивания расплава. Два 70-тонных миксера сопротивления введены в эксплуатацию на Красноярском алюминиевом заводе.

Оправдано применение печей сопротивления, если необходимо плавить сплавы с температурой плавления до 1400°С (чугун и медные сплавы – латунь и бронзу) в малых объемах – до нескольких литров. Для этого используются малые (фактически настольные) камерные печи (рис. 2.11), в которые помещаются графитовые или алундовые тигли. Стержневые нагреватели из карбида кремния или хромита лантана размещаются вертикально у стенок камеры. Такие печи обычно используются для целей художественного литья в домашних условиях или в небольших мастерских.



Рис. 2.11. Малогабаритные печи для плавки медных сплавов и чугуна

**Жидкостными ваннами** называются печи сопротивления, в которых изделия нагреваются, будучи погруженными в жидкую среду (теплоноситель) – масло, расплавы солей и щелочей и, в ряде случаев, расплавы щелочных металлов или свинца. Основным механизмом теплопередачи в жидкостных ваннах – конвективный. Жидкостные ванны применяются, главным образом, для термообработки ответственных металлических изделий при температуре до 1300°C. По сравнению с печами с воздушной или газовой средой и вакуумными, жидкостные ванны обладают рядом преимуществ.

1. *Сочетание высокой скорости нагрева и равномерности температурного поля даже для изделий сложной формы.* Это возможно благодаря конвективной теплопередаче. В печах с преобладанием теплопередачи излучением (средне- и высокотемпературных с воздушной или газовой средой и вакуумных) изделия сложной формы (например, коленчатые валы) прогреваются неравномерно из-за местного экранирования теплового излучения. При этом скорость нагрева изделий в жидкостных ваннах высока, поскольку значение коэффициента теплоотдачи конвекцией в жидких соляных и щелочных средах достигает 600–700 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), что в 2–4 раза выше, чем коэффициент теплоотдачи излучением в печах с воздушной или газовой средой и вакуумных при тех же температурах. При использовании жидкометаллического теплоносителя коэффициент теплоотдачи конвекцией еще значительно выше.

2. *Жидкая среда может выступать в качестве защитной или активной (например, цементационной),* причем защитные свойства жидкости сохраняются и после извлечения изделия из ванны, то есть во время его остывания: пленка жидкости на поверхности изделия, при высыхании превращающаяся в соляную или щелочную корочку, надежно защищает поверхность от контакта с кислородом воздуха.

3. *Благодаря преимущественно конвективному теплообмену степень черноты изделий не влияет на процесс нагрева в жидкостной ванне.*

Недостатки жидкостных ванн следующие.

1. *Большие потери тепла с поверхности ванны, необходимость предварительного разогрева среды (специальным погружным пусковым нагревателем или газовой горелкой) до температуры плавления и ее подогрева при простоях.*

2. *Значительные потери теплоносителя вследствие угара и испарения.*

3. *Токсичные выбросы.*

4. *Опасность пожара и взрыва.*

Жидкостные ванны бывают: *с внешним обогревом*, когда нагреватели располагаются снаружи ванны; *с внутренним обогревом* погруженными в теплоноситель трубчатыми электронагревателями; *электродные ванны*, в которых ток протекает непосредственно по теплоносителю между электродами, и джоулево тепло выделяется в самом теплоносителе.

Ванны с внутренним обогревом по сравнению с ваннами с внешним обогревом характеризуются несколько меньшими тепловыми потерями, меньшими габаритами и существенно меньшим расходом нагревательных сплавов.

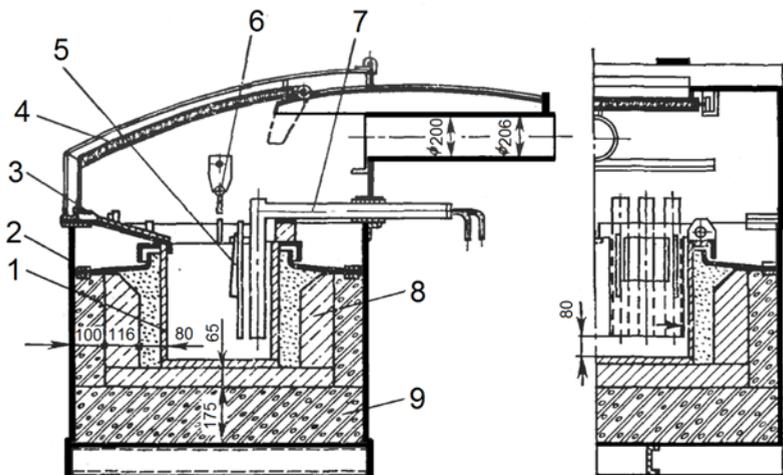
Наиболее эффективны электродные ванны. Они бывают двух типов – с *охватывающими загрузку электродами* и с *вынесенными электродами*. У первых электроды представляют собой пластины большой площади, поэтому плотность тока невелика, и циркуляция среды под действием электродинамических сил отсутствует, в наличии лишь естественное конвективное движение среды, не обеспечивающее высокой скорости нагрева изделия и равномерности температурного поля. Кроме того, в ванне с охватывающими электродами ток протекает, в том числе, через саму загрузку (если она проводящая), что в случае сложной формы загрузки приводит к местным перегревам. Из-за указанных недостатков жидкостные ванны с охватывающими электродами в настоящее время практически не используются.

В ваннах с вынесенными электродами (рис. 2.12) электроды в виде стержней круглого или прямоугольного сечения опускаются в жидкую среду на расстоянии 25–50 мм друг от друга вблизи от одной из стенок ванны (в стороне от загрузки). Из-за большой плотности тока между электродами возникает интенсивная циркуляция среды (конвективная вследствие перегрева среды между электродами, а также под действием электродинамических сил), повышающая скорость нагрева загрузки и равномерность температурного поля. Чтобы полностью исключить протекание тока непосредственно по загрузке, часть ванны, где расположены электроды, отделяется от ее рабочей части непроводящей перегородкой.

Естественно, рабочая температура жидкостной ванны выше температуры плавления используемого теплоносителя и ниже температуры его кипения.

Особо интенсивный конвективный теплообмен происходит при использовании в качестве теплоносителя расплава щелочного металла (натрия). Коэффициент теплоотдачи при этом достигает огромных значений 10 000–30 000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Натриевые ванны не получили широкого распространения из-за большой взрывоопасности, поскольку при попадании в расплав даже малого количества воды начинается щелочная реакция с бурным выделением водорода и образованием гремучей смеси.

В случае электродных ванн *питание осуществляется только переменным током* во избежание электролиза теплоносителя (соли или щелочи) с выделением ядовитых газов. Напряжение питания электродной ванны составляет 6–18 В, используется понижающий трансформатор. Жидкостные ванны достигают больших размеров (длина до 6–8 м) и имеют мощность до нескольких сотен киловатт.

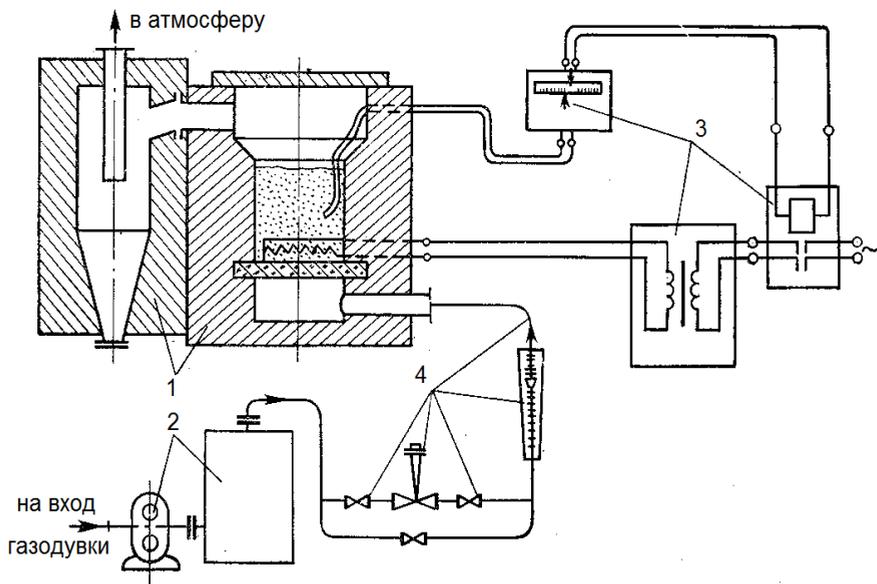


**Рис. 2.12. Электродная ванна с вынесенными электродами:**

- 1 – ванна; 2 – кожух; 3 – фартук; 4 – зонт; 5 – перегородка;  
 6 – пирометр (датчик температуры); 7 – электрод;  
 8 – огнеупорная кладка; 9 – теплоизоляция

Обладают всеми преимуществами жидкостных ванн и в то же время свободны от их недостатков, связанных с необходимостью предварительного подогрева, токсичностью и взрывоопасностью, **печи с псевдокипящим слоем**. В таких печах изделие помещается в облако из мелких частиц (песка, карборундового или графитового порошка), взвешенных в сильном потоке воздуха или другого газа. Такое облако, называемое «псевдокипящим слоем» (поверхность такого слоя визуально напоминает кипящую жидкость), по своим свойствам как теплоноситель близко к жидкости. Коэффициент теплоотдачи как от нагревателей к псевдокипящему слою, так и от него к нагреваемому изделию довольно велик и составляет  $400\text{--}500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Принципиальная схема печи с псевдокипящим слоем представлена на рис. 2.13. Воздух из газодувки (компрессора) через ресиверную емкость и систему регулирования расхода воздуха подается в нижнюю часть шахтной печи, под газораспределительную решетку, поверх которой насыпан рабочий материал, например, песок. Газораспределительная решетка газопроницаема, она изготавливается из пористого керамического материала (пеношамотные плиты до  $1100^\circ\text{C}$ , высокоглиноземистый легковес при температуре свыше  $1100^\circ\text{C}$ ). Поток воздуха, прошедшим через газораспределительную решетку, слой песка поднимается, заполняя всю шахту и образуя псевдокипящий слой. В печи используются ленточные или проволочные нагреватели из сплава сопротивления. Частицы песка, ушедшие из рабочего пространства печи с воздухом, улавливаются фильтром-циклоном или электрофильтром и могут быть снова использованы.



**Рис. 2.13. Принципиальная схема печи с псевдокипящим слоем:**

1 – печь с псевдокипящим слоем и фильтром; 2 – газодувка с ресивером;  
3 – система регулирования температуры; 4 – система регулирования расхода воздуха

В случае использования вместо песка карборундового порошка или частиц графита псевдокипящий слой является проводящим, и можно организовать пропускание тока непосредственно через него с помощью металлических электродов. В случае графитовых частиц требуется защитная атмосфера в печи, чтобы они не сгорали.

Разумеется, в псевдокипящем слое, являющемся хорошим теплоносителем, изделия можно не только нагревать, но и охлаждать. Известен способ закалки в псевдокипящем слое.

## 2.6. Установки инфракрасного нагрева

Спектр теплового излучения (зависимость интенсивности излучения от длины волны) различается у разных тех. То же самое можно сказать и о **спектре поглощения**, который представляет собой зависимость **поглощательной способности** тела от длины волны теплового излучения. Поглощательная способность  $A$  – это поглощаемая телом доля энергии теплового излучения, попавшего на поверхность этого тела. У абсолютно черных тел  $A = 1$ , т.е. такое тело поглощает 100% энергии теплового излучения, ничего не отражая и не пропуская.

Спектры излучения и поглощения различных тел показаны на рис. 2.14. Спектр излучения абсолютно черного тела (кривая 1) непрерывен и соответствует закону Планка (1.24). Спектр излучения так называемого *серого тела* (кривая 2), имеющего степень черноты меньше единицы, также непрерывен и подобен спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при той же температуре, т.е. интенсивности излучения АЧТ и серого тела при каждой длине волны пропорциональны. Спектр излучения **селективных излучателей** (кривая 3) не является непрерывным, такое тело излучает тепловую энергию только в некоторых полосах длин волн.

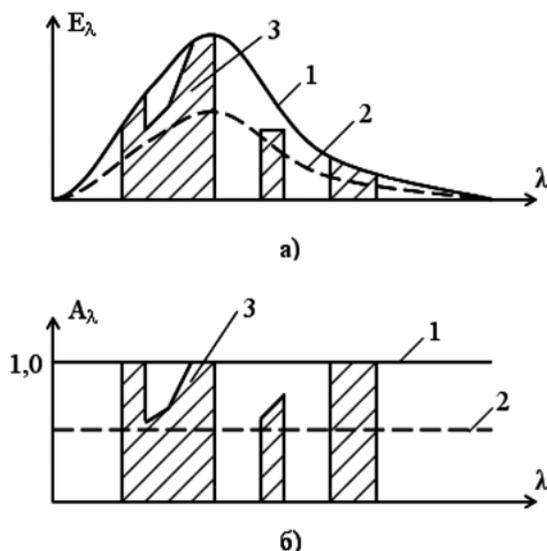


Рис. 2.14. Спектры излучения (а) и поглощения (б) абсолютно черного (1), серого тел (2) и селективного излучателя (3)

Поглотительная способность АЧТ равна единице во всем диапазоне длин волн, у серого тела она также не зависит от длины волны, но имеет значение меньше единицы (и численно равна степени черноты). У селективных излучателей спектр поглощения, как и спектр излучения, разрывный, причем *тело, обладающее свойствами селективного излучателя, интенсивно поглощает тепловые волны в тех же полосах длин волн, в которых излучает их*. На этом важном свойстве селективных излучателей основан один из способов организации нагрева сопротивления, называемый **инфракрасным нагревом**.

*Инфракрасный нагрев – способ организации нагрева сопротивления, при котором, путем подбора температуры нагревателя (излучателя), добиваются того, что максимум интенсивности (спектральной плотности) излучения нагревателя приходится на область наибольшего поглощения энергии теплового излучения загрузки, представляющей собой тело со свойствами селективного излучателя.*

Действительно, изменяя температуру нагревателя, представляющего собой серое тело, мы заставляем максимум спектральной плотности излучения смещаться в соответствии с законом Вина в сторону более коротких волн при увеличении температуры и в сторону более длинных волн при ее уменьшении. Таким образом, можно добиться наложения максимума интенсивности излучения нагревателя на область, в которой селективная загрузка наиболее хорошо поглощает энергию теплового излучения и, следовательно, нагревается наиболее интенсивно.

Отметим, что «инфракрасный нагрев», как он понимается согласно данному определению – это устоявшийся технический термин. С точки зрения же физики, любой нагрев в печи сопротивления с теплопередачей преимущественно излучением можно считать инфракрасным, поскольку при температурах, характерных для ЭПС, основная доля (80% и более) энергии излучения передается от нагревателей загрузке в инфракрасном диапазоне (остальная – в видимом).

Подчеркнем, что *инфракрасный нагрев применим только к телам, обладающим свойствами селективных излучателей*. К таким телам относятся газы, ряд жидкостей, полимеры, живые организмы, включая человеческое тело, и т.п.

Можно отметить важные *достоинства инфракрасного нагрева*.

1. При наличии у обрабатываемого материала спектральных областей (областей длин волн), в которых излучение проникает вглубь материала, можно создать объемное тепловыделение и тем самым ускорить нагрев.

2. При нагреве многокомпонентных дисперсных систем можно добиться преимущественного нагрева одного из компонентов. Это позволяет, например, при сушке древесины, фруктов или химических реактивов нагревать преимущественно влагу, подлежащую испарению, а не твердую фазу, в результате энергетическая эффективность сушки повышается. Отметим, что *наиболее интенсивному поглощению энергии излучения водой соответствует температура нагревателя (излучателя) 575°С*.

3. При инфракрасном обогреве помещений появляется возможность местного обогрева только тех площадей в помещении, в которых это необходимо, без обогрева всего объема помещения.

4. Помимо теплового действия, инфракрасное излучение способно оказывать на материалы физико-химическое и биологическое действие. Например, считается, что длинноволновое инфракрасное излучение благотворно влияет на организм человека и животных.

Инфракрасный нагрев применяется для:

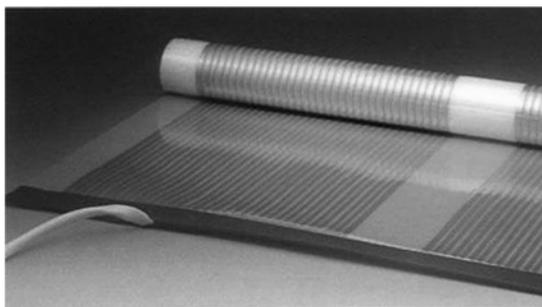
- сквозного нагрева пластмасс под пластическую деформацию;
- сушки зерна, ткани, бумаги, фруктов, реактивов и т.п.;
- сушки лакокрасочных покрытий, в том числе нанесенных на крупные изделия (например, в автомобильной промышленности);
- сушки и полимеризации компаундов, смол;
- нагрева асфальта при выполнении дорожных работ;

– обогрева животных (в том числе молодняка) и людей («теплые полы», системы инфракрасного обогрева жилых, общественных и производственных помещений, инфракрасные сауны и др.), приготовления пищи (инфракрасные грили, тостеры).

Отметим, что *при сушке лакокрасочных покрытий температуру нагревателя подбирают таким образом, чтобы максимум интенсивности излучения попадал не в область наибольшего поглощения энергии излучения лакокрасочным покрытием, а наоборот, в область длин волн, в которой покрытие прозрачно для теплового излучения (пропускает значительную его долю)*. При таком подборе основная доля тепла выделится в подложке (окрашенной поверхности) и нагреет ее. В результате глубинный слой краски, прилегающий к подложке, будет нагрет от нее до более высокой температуры, что обеспечит благоприятные условия для дрейфа влаги снизу вверх к открытой поверхности слоя. Кроме того, более низкая температура верхних слоев краски препятствует образованию на поверхности пленки, которая затрудняет выход влаги.

Нагреватели для инфракрасного нагрева (ИК-нагреватели) делятся на низкотемпературные («темные»), среднетемпературные («светлые») и высокотемпературные («светлые»).

*Низкотемпературные («темные») инфракрасные нагреватели* работают при температуре 400–700°C, поэтому максимум интенсивности их излучения приходится, в соответствии с законом Вина, на длину волны 3–4 мкм. Название «темные» связано с тем, что при температурах до 700°C нагреватели визуально представляются темными. В качестве «темных» ИК-нагревателей могут использоваться трубчатые электронагреватели (ТЭН). Также используются керамические (нагревательная спираль встроена в керамическое тело) и пленочные инфракрасные нагреватели (последние представляют собой пленку из полиуретана, внутри которой размещаются тепловыделяющие проводники – металлические или из углеродного волокна). Пленочные ИК-нагреватели (рис. 2.15) удобны для организации «теплых полов» в помещениях.



**Рис. 2.15. Пленочный инфракрасный обогреватель**

*Среднетемпературные («светлые») ИК-нагреватели* (температура 700–1200°С, максимум интенсивности излучения при длине волны 2–3 мкм) представляют собой кварцевые трубки с нихромовой спиралью внутри.

*Высокотемпературные («светлые») ИК-нагреватели* работают при температуре 1200–2500°С, а в некоторых случаях и выше, длина волны, соответствующая максимуму интенсивности излучения, составляет примерно 1–2 мкм. В качестве высокотемпературных ИК-нагревателей используются зеркальные лампы накаливания и кварцевые галогенные лампы.

*Зеркальная лампа накаливания* (рис. 2.16а) по форме и конструкции напоминает обычную осветительную лампу накаливания, но она обычно крупнее (стандартный диаметр 125 или 177 мм) и мощнее (275–500 Вт). Для того, чтобы поток излучения направлялся на нагреваемое изделие, а не на стенку, на которой установлена лампа, колба лампы со стороны, прилегающей к цоколю, имеет зеркальное покрытие из алюминия. Температура вольфрамовой нити такой лампы достигает 2000°С. Срок службы такой лампы при непрерывной работе может превышать 5000 часов.

*Кварцевая галогенная лампа* (рис. 2.16б) представляет собой герметичную кварцевую трубку, реже колбу, заполненную инертным газом в смеси с парами галогена (йода), с вольфрамовой спиралью внутри. Пары галогена защищают вольфрам от испарения, благодаря чему галогенные лампы могут работать при температуре нити до 2500°С и несколько выше. Кварцевые галогенные лампы (в трубчатом исполнении) имеют длину рабочей части до 450 мм (габаритная длина до 750 мм), мощность серийно выпускаемых ламп до 3,5 кВт. Инфракрасный нагрев является перспективным методом нагрева, распространение которого в различных отраслях промышленности, в коммунальном хозяйстве и в быту постоянно расширяется.



**Рис. 2.16. Высокотемпературные «светлые» инфракрасные нагреватели:** зеркальные лампы накаливания (а) и кварцевые галогенные лампы (б)

## 2.7. Установки прямого нагрева

В отличие от печей сопротивления косвенного нагрева, в установках прямого нагрева преобразование электрической энергии в тепловую происходит непосредственно в нагреваемом теле, включенном в цепь тока. Количество теплоты, выделяемой в теле при протекании тока, по закону Джоуля–Ленца равно

$$Q = I^2 R \tau, \text{ Дж}, \quad (2.1)$$

где  $I$  – ток, А;  $R$  – активное сопротивление нагреваемого изделия, Ом;  $\tau$  – время протекания тока, с.

Разумеется, прямой нагрев возможен только для изделий, изготовленных из однородных материалов с высокой электрической проводимостью (как правило, с металлическим типом проводимости). Кроме того, площадь поперечного сечения изделия должна быть неизменной по его длине, иначе в местах с меньшим сечением плотность тока будет выше и, следовательно, возникнут местные перегревы.

**Установки прямого нагрева сопротивления** используются для нагрева заготовок из черных и цветных металлов для целей горячей обработки давлением (ковки, штамповки и т.п.), нагрева металлических изделий под термическую обработку (закалку, отпуск, отжиг). Прямой нагрев изделий благодаря объемному тепловыделению происходит весьма быстро (редко занимает более нескольких десятков секунд), что обеспечивает высокую производительность при малых габаритах установки. Малая длительность процесса нагрева препятствует образованию окалины (поверхность изделия не успевает окислиться), помимо прямой экономии металла, это способствует увеличению срока службы кузнечнопрессового оборудования, на износ которого существенно влияет наличие окалины на заготовках.

К недостаткам установок прямого нагрева, по сравнению с печами косвенного нагрева, относятся ограничения по материалу и форме нагреваемых изделий, сложность автоматического регулирования температуры, недостаточно высокое (0,7–0,9) значение коэффициента мощности. Сложности при эксплуатации установок прямого нагрева вызывает эрозия контактов, присоединенных к изделию, сокращающая срок их службы, при больших токах.

Удельный расход электроэнергии (количество электроэнергии, затраченной на нагрев, отнесенное к массе нагреваемого изделия) в установках прямого нагрева составляет 0,35–0,5 кВт·ч/кг, КПД таких установок лежит в пределах 50–80%. Прямой нагрев может осуществляться до температур 1200°C и более.

Схема установки прямого нагрева цилиндрических заготовок приведена на рис. 2.17. Заготовка зажимается в контактах специальным устройством – зажи- мом (прямой нагрев сопротивления также называют *электроконтактным нагре-*

вом). К контактам от понижающего трансформатора подведено переменное напряжение, как правило, 5–25 В. Ток, протекающий по заготовке, определяется полным сопротивлением контура  $Z$

$$I = U/Z,$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + x^2}$ ;  $R = R_{\text{изд}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{тр}} + R_{\text{к}}$  – сумма активных сопротивлений изделия (заготовки), токоподвода и обмоток трансформатора и переходного сопротивления контакт – изделие  $R_{\text{к}}$ ;  $x = x_{\text{изд}} + x_{\text{тп}} + x_{\text{тр}}$  – сумма индуктивных сопротивлений изделия (заготовки), токоподвода и обмоток трансформатора.

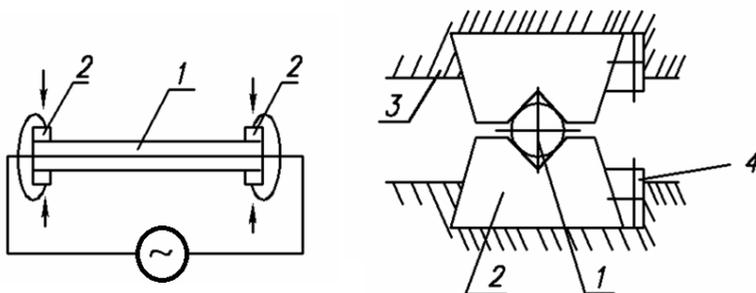


Рис. 2.17. Схема установки прямого нагрева цилиндрических заготовок:

- 1 – заготовка; 2 – медные контакты;  
3 – охлаждаемые контактодержатели; 4 – прижим

Вследствие поверхностного эффекта – вытеснения тока к поверхностным слоям заготовки – плотность тока распределена по сечению изделия неравномерно, ближе к поверхности она больше. Закон изменения плотности тока по толщине заготовки имеет вид

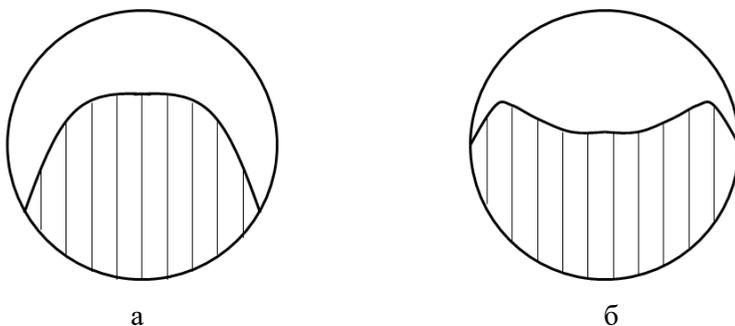
$$J = J_0 e^{-\frac{2\pi\mu\mu_0 f}{\rho} x}, \quad (2.2)$$

где  $J_0$  – плотность тока на поверхности изделия;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $f$  – частота тока (при прямом нагреве, как правило, используется ток сетевой частоты 50 Гц);  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала изделия;  $x$  – расстояние от поверхности изделия.

Неравномерность распределения плотности тока по сечению изделия приводит к тому, что тепловыделение в изделии также происходит неравномерно: наибольшее количество теплоты выделяется в поверхностных слоях. На первый взгляд кажется, что прямой нагрев на постоянном токе, когда поверхностный эффект отсутствует, позволит получить более равномерное распределение температуры по сечению изделия. Однако на деле при этом поверхностные слои

вследствие интенсивного отвода тепла от поверхности (конвекцией и излучением) будут существенно холоднее, чем центр изделия. При нагреве же на переменном токе этот эффект в значительной степени компенсируется усиленным тепловыделением в поверхностных слоях, поэтому *при прямом нагреве на переменном токе перепад температуры между поверхностью и центром будет даже меньше, чем на постоянном токе* (рис. 2.18). Прямой нагрев на постоянном токе можно рекомендовать для изделий со сложной формой сечения (нецилиндрических), это позволит избежать местных перегревов и недогревов.

Наиболее ответственной частью установки прямого нагрева являются контакты, присоединяемые к изделию. Правильно спроектированные контактные устройства обеспечивают приемлемый срок службы и энергетическую эффективность (высокое значение КПД) установки.



**Рис. 2.18. Распределение температуры по сечению нагреваемого изделия при прямом электронагреве сопротивления на постоянном (а) и переменном (б) токе**

Электрический КПД установки прямого нагрева определяется как

$$\eta = \frac{R_{\text{изд}}}{R_{\text{изд}} + R_{\text{тп}} + R_{\text{тр}} + R_{\text{к}}} . \quad (2.3)$$

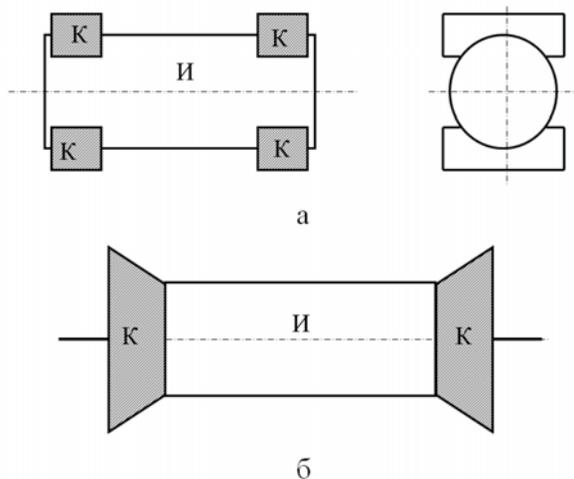
Таким образом, для повышения энергетической эффективности установки необходимо снижать как собственно сопротивление контактов и токоподводов  $R_{\text{тп}}$ , так и переходное сопротивление контакт – изделие  $R_{\text{к}}$ .

Чтобы уменьшить переходное сопротивление, контакт необходимо плотно прижимать к поверхности изделия, для этого используются механические, пневматические или гидравлические устройства прижима, обеспечивающие усилие до 5 т. Переходное сопротивление обратно пропорционально величине  $P^\alpha$ , где  $P$  – давление на контакт;  $\alpha$  – показатель степени, зависящий от формы контакта и равный 0,5–1.

Для того, чтобы контакты имели малое сопротивление, их изготавливают из меди или медного сплава (бронзы). Бронза во многих случаях предпочтительнее меди, поскольку она при достаточно низком удельном сопротивлении обла-

дает существенно меньшей, чем у чистой меди, теплопроводностью, что уменьшает утечку тепла через контакты и предотвращает захлаживание областей изделия, примыкающих к контактам.

В установках прямого нагрева периодического действия наиболее распространены радиальные и торцевые (рис. 2.19) контакты с принудительным воздушным или водяным охлаждением.



**Рис. 2.19. Радиальные (а) и торцевые (б) контакты установок прямого нагрева периодического действия:**  
К – контакт, И – нагреваемое изделие

Также распространены *установки прямого нагрева непрерывного действия* – проходные, предназначенные для нагрева непрерывно подаваемых цилиндрических заготовок, и протяжные – для нагрева проволоки. В установках непрерывного действия при токах до 500 А используются *сухие контакты* – скользящие (подобные токосъемникам троллейбуса) или роликовые. При токах свыше 500 А возникает искрение сухих контактов, приводящее к быстрой эрозии, поэтому при таких токах используются *полужидкостные* (сухие, непрерывно смачиваемые проводящей жидкостью) или *жидкостные* (расплавы свинца, солей, щелочей) контакты.

Помимо нагрева металлических заготовок и изделий, прямой нагрев сопротивления применяется для графитации угольных изделий (получения искусственного графита), получения карбида кремния (карборунда), варки стекла, получения горячей воды и пара и т.п.

Графитация угольных изделий (например, электродов дуговых сталеплавильных печей) – длительный (до 100 ч) процесс, требующий температуры 2300–2800°С. Работа печи косвенного нагрева при таких температурах была бы

возможна только при наличии вакуума или дорогостоящих инертных газов в рабочем пространстве. Печи же прямого нагрева для графитации очень просты и надежны в эксплуатации. Они выполняются, как правило, в виде прямоугольных камер, куда загружаются угольные изделия (кern), вокруг которых засыпается графитовая или угольная крошка, которая выполняет функцию электропроводящих мостов между изделиями, защищает изделия от окисления (от доступа воздуха) и одновременно служит тепловой изоляцией. Подвод тока к нагрузке осуществляется графитированными блоками, которыми выложены торцевые стенки печи.

Для варки стекла используются комбинированные газозлектрические печи. Расплавление шихты (исходных материалов) с образованием жидкой стекломассы осуществляют газовые горелки, затем в стекломассу опускаются стальные или графитовые электроды, и дальнейшая варка стекла с добавлением различных присадок осуществляется при прямом нагреве пропусканием тока через стекломассу. Косвенный нагрев стекломассы неэффективен, поскольку стекломасса прозрачна и поэтому плохо поглощает тепловое излучение.

Для получения горячей воды и пара используются электродные нагреватели жидкости (электродные котлы), в которых тепловыделение достигается прямым пропусканием тока через воду. Существуют электродные котлы самой разной производительности и мощности – от небольших бытовых устройств до крупных котлов мощностью в сотни киловатт. Достоинствами электродных котлов являются малая тепловая инерционность (рабочий режим достигается уже через 10–20 минут после включения), простота регулирования температуры, высокий КПД (до 98%), малые габариты.

## 2.8. Тепловой расчет ЭПС периодического действия

Задачей теплового расчета ЭПС является *определение установленной мощности печи*, значение которой затем используется при расчете нагревательных элементов и выборе электрооборудования печной установки.

Количество энергии, потребляемой из сети, и установленная мощность печи зависят, прежде всего, от температурно-временного режима обработки, заданного технологическим процессом, т.е. от цикла работы печи.

Наиболее широко применяемые в практике циклы работы печей представлены на рис. 2.20. Простейший цикл (рис. 2.20а) предусматривает только нагрев изделия до конечной температуры  $t''_{\text{изд}}$ . Такой режим характерен для нагрева теплотехнически тонких загрузок – тонкостенных изделий из черных металлов или изделий из материалов с высокой теплопроводностью (медных и алюминие-

вых сплавов), когда нет необходимости в выдержке для выравнивания температурного поля по сечению изделия. Наиболее часто по такому циклу работают печи для нагрева заготовок из цветных металлов под пластическую деформацию или для закалки тонкостенных изделий.

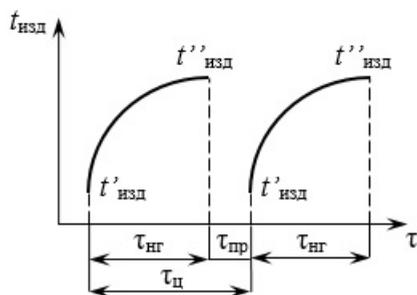
Наиболее распространен цикл (рис. 2.20 б), включающий нагрев и выдержку изделий при постоянной температуре. Выдержка проводится с целью выравнивания температуры по сечению и обеспечения структурных превращений в материале (при отпуске, обжиге керамики и т.п.). Этот цикл характерен для процессов закалки, отпуска, нормализации, термохимической обработки металлов, обжига керамики.

Цикл, состоящий из нагрева, выдержки и последующего остывания изделий в печи (рис. 2.20 в), имеет место при отжиге металлов, спекании металлокерамических изделий, получении монокристаллов и в других случаях, когда требуются медленное остывание и выдача изделий из печи только после остывания до определенной температуры. Такой цикл наиболее энергоемок, поскольку во время остывания печь бесполезно теряет большое количество теплоты, аккумулированной в процессе нагрева и выдержки. Вследствие этого резко снижается КПД печи и возрастает удельный расход электроэнергии.

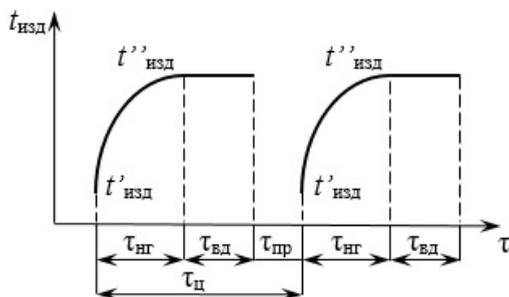
Чтобы обеспечить использование тепла, аккумулированного конструкцией печи, целесообразно по окончании нагрева и выдержки переносить изделия из печи в отдельную футерованную камеру или колодец, предназначенные для медленного остывания изделий, предусмотренного технологическим процессом, а в освободившуюся печь, еще горячую, быстро загружать новые изделия. Если же невозможно разгерметизировать рабочее пространство печи до окончания остывания (процесс проводится в защитной среде или вакууме), то применяются такие технические решения, как перенос нагревательного колпака на другой стенд с загрузкой в колпаковых печах после окончания нагрева и выдержки (первая загрузка остается под герметичным муфелем, где и остывает), организация отдельной камеры охлаждения в вакуумных печах, куда шлюзуются изделия из основной камеры после нагрева и выдержки, и т.п. В печах непрерывного действия остывание изделий происходит вне печи в специальной зоне охлаждения, при этом КПД и расход электроэнергии не зависят от времени остывания.

В общем случае (рис. 2.20 в) время цикла работы печи  $\tau_{\text{ц}}$  состоит из времени нагрева  $\tau_{\text{нг}}$ , времени выдержки  $\tau_{\text{вд}}$ , времени остывания  $\tau_{\text{ост}}$  и времени простоя  $\tau_{\text{пр}}$ , которое включает в себя время выгрузки и загрузки изделий.

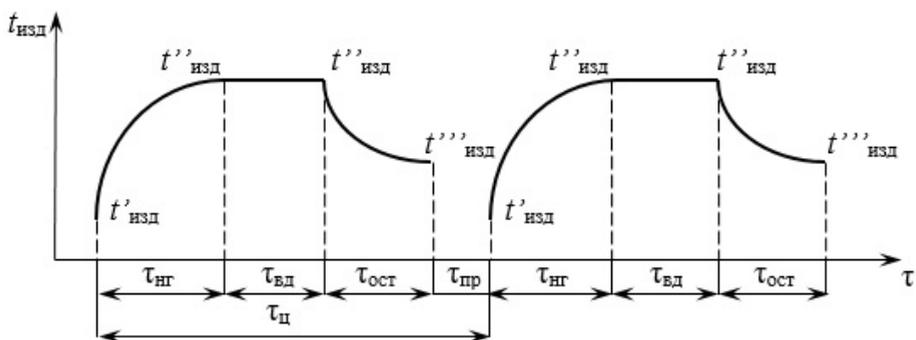
Об определении времени нагрева, выдержки и остывания подробно рассказано в [9]. Время простоя указывается в техническом задании на проектирование печи.



а



б



в

**Рис. 2.20. Циклы работы печей:**  
 нагрев без выдержки (а); нагрев с выдержкой (б);  
 нагрев с выдержкой и остыванием в печи (в)

Тепловой расчет печи периодического действия основан на составлении энергетического баланса печи. Тепло, выделившееся в нагревателях за время одного цикла, расходуется на нагрев изделий (*полезное тепло*), нагрев жароупорной тары и газовой среды (*вспомогательное тепло*) и компенсацию *тепловых потерь*

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{п.т.}} \quad (2.4)$$

Полезное тепло определяется как

$$Q_{\text{пол}} = G_{\text{изд}} c_{\text{изд}} (t''_{\text{изд}} - t'_{\text{изд}}) + Q_{\text{эндо}} - Q_{\text{экзо}}, \text{ Дж}, \quad (2.5)$$

где  $G_{\text{изд}}$  – масса загрузки, кг;  $c_{\text{изд}}$  – средняя удельная теплоемкость материала нагреваемого изделия (загрузки) в интервале температур от начальной до конечной температуры нагрева, Дж/(кг·°C);  $t'_{\text{изд}}$  и  $t''_{\text{изд}}$  – начальная и конечная температуры нагрева изделия, °C;  $Q_{\text{эндо}}$  – тепло, потребное для осуществления эндотермических реакций и фазовых превращений (например, испарения или плавления), Дж;  $Q_{\text{экзо}}$  – тепло, выделяющееся при экзотермических реакциях, Дж.

Вспомогательное тепло складывается из тепла, идущего на нагрев поддонов, ящиков, муфельей и тому подобной жароупорной тары, загружаемой в печь вместе с нагреваемым изделием, а также тепла, идущего на нагрев искусственной газовой атмосферы в печах светлого (т.е. бескислородного) отжига, цементационных и нитроцементационных и др.

$$Q_{\text{всп}} = G_{\text{жароуп}} c_{\text{жароуп}} (t_{\text{жароуп. к}} - t_{\text{жароуп. нач}}) + G_{\text{газ}} c_{\text{газ}} (t_{\text{газ. к}} - t_{\text{газ. нач}}), \text{ Дж}, \quad (2.6)$$

где  $G_{\text{жароуп}}$  – масса поддонов и других жароупорных конструкций, загружаемых в печь за цикл, кг;  $G_{\text{газ}}$  – масса защитного или активного газа, вводимого в печь за цикл, кг;  $c_{\text{жароуп}}$ ,  $c_{\text{газ}}$  – средние удельные теплоемкости жароупорных конструкций и газа в соответствующем интервале температур, Дж/(кг·°C);  $t_{\text{жароуп. нач}}$ ,  $t_{\text{жароуп. к}}$ ,  $t_{\text{газ. нач}}$ ,  $t_{\text{газ. к}}$  – температуры жароупорных конструкций и газа в начале и в конце нагрева.

Температура жароупорных конструкций и газа в начале нагрева принимается равной начальной температуре изделий, температура жароупорных конструкций в конце нагрева – равной конечной температуре нагрева изделий; температура газа в конце нагрева – равной температуре печи.

Масса защитного газа, вводимого в печь за цикл,  $G_{\text{газ}}$  определяется умножением плотности газа, взятой при температуре печи, на объемный расход газа, усредненное значение которого принимается равным 6,5 м<sup>3</sup> на 1 тонну массы загрузки. В случае использования активной атмосферы ее объемный расход задается технологом.

Тепловые потери печи за цикл складываются из потерь тепла за время нагрева, время выдержки, время остывания и время простоя

$$Q_{\text{п.т.}} = K_{\text{н.п.}}(P_{\text{п.т. ср. нг}}\tau_{\text{нг}} + P_{\text{п.т. ср. выд}}\tau_{\text{выд}} + P_{\text{п.т. ср. ост}}\tau_{\text{ост}} + P_{\text{п.т. ср. пр}}\tau_{\text{пр}}), \text{ Дж}, \quad (2.7)$$

Где  $P_{\text{п.т. ср. нг}}$ ,  $P_{\text{п.т. ср. выд}}$ ,  $P_{\text{п.т. ср. ост}}$ ,  $P_{\text{п.т. ср. пр}}$  – средние значения мощности тепловых потерь печи соответственно за время нагрева, выдержки, остывания и простоя, Вт;  $K_{\text{н.п.}}$  - коэффициент неучтенных потерь, учитывающий потери через *тепловые короткие замыкания* (металлические стержни, проходящие насквозь через футеровку, выводы термодпар, нагревателей и т.п.). Значение коэффициента неучтенных потерь  $K_{\text{н.п.}}$  для среднетемпературных общепромышленных печей принимается равным 1,15...1,25.

Расчет мощности тепловых потерь печи производится для установившегося режима работы в соответствии с законами теплопередачи. Потери через футеровку (свод, под и боковые стены) определяются по формулам для расчета тепловых потерь в стационарном режиме через многослойную стенку (см. §1.3, Задача 1.3) с граничными условиями 1-го рода на внутренней поверхности (задана температура печи) и 3-го рода на наружной поверхности (заданы температура окружающей среды и коэффициент теплоотдачи конвекцией).

Из-за того, что теплопроводность футеровочных материалов зависит от температуры, задача расчета тепловых потерь через футеровку является нелинейной и решается методом последовательных приближений. По окончании расчета (когда разница двух последовательных приближений температур станет меньше заданной точности) необходимо проверить температуры границ слоев футеровки (они не должны быть выше допустимых рабочих температур для используемых материалов), а также температуру кожуха (наружной поверхности футеровки), которая не должна превышать 60°C из соображений безопасности эксплуатации. Если температура на границе слоя превышает допустимую, следует либо заменить материал, либо увеличить толщину предыдущего (внутреннего) слоя, и повторить расчет.

Если температура кожуха значительно ниже допустимого значения, это свидетельствует о том, что футеровка печи выполнена чересчур массивной, и аккумулируемое футеровкой тепло будет слишком велико. Лучше, если температура кожуха лежит в пределах 45–60°C.

Следует помнить, что при расчете естественно охлаждаемых футеровок в качестве исходного данного следует задаваться не температурой наружной поверхности футеровки, а температурой окружающего воздуха и коэффициентом конвективной теплоотдачи, при этом температура наружной поверхности рассчитывается.

Отдельно подсчитываются тепловые потери через закрытую и открытую дверцу, причем учитывается время открытого состояния дверцы  $\tau_{\text{откр}}$

$$P_{\text{п.т.дв}} = P_{\text{п.т.откр.дв}} \cdot \frac{\tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{цикл}}} + P_{\text{п.т.закр.дв}} \cdot \frac{\tau_{\text{цикл}} - \tau_{\text{откр}}}{\tau_{\text{цикл}}}, \text{ Вт}, \quad (2.8)$$

где  $P_{\text{п.т.откр.дв}}$  и  $P_{\text{п.т.закр.дв}}$  – потери тепла через открытую и закрытую дверцу, Вт.

Потери через закрытую дверцу определяются так же, как потери через любую стенку, потери через открытую дверцу определяются как потери конвекцией (для средне- и высокотемпературных печей пренебрежимо малы) и излучением. Потери на излучение определяются как

$$P_{\text{п.т.изл.}} = 5,67\varepsilon \left[ \left( \frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{проема}} \psi \text{ Вт}, \quad (2.9)$$

где  $T_{\text{печи}}$  – абсолютная температура печи, К;  $T_{\text{окр}}$  – абсолютная температура окружающего печь воздуха, К;  $F_{\text{проема}}$  – площадь проема дверцы, м<sup>2</sup>;  $\psi$  – коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину проема и экранирующее действие его стенок, значения коэффициента диафрагмирования могут быть взяты из рис. 5.6 в [3];  $\varepsilon$  – эквивалентная степень черноты, для малых проемов она принимается равной 1,0, а для больших, приближающихся по своим габаритам к размеру рабочего пространства печи – равной 0,8.

Потери тепла за время остывания изделий в печи определяются, как разность количества теплоты, аккумулированной футеровкой при температурах  $t''_{\text{изд.}}$  и  $t'''_{\text{изд.}}$

$$P_{\text{п.т.ср.ост.}} \tau_{\text{ост.}} = Q''_{\text{акк}} - Q'''_{\text{акк}}. \quad (2.10)$$

Для определения количества теплоты, аккумулированной футеровкой, необходимо знать теплоемкость и массу огнеупорных и теплоизоляционных материалов и средние температуры слоев футеровки, соответствующие началу и концу остывания (получаются в результате расчета футеровки по методике §1.3, Задача 1.3).

Потребное количество энергии, которое необходимо ввести в печь за время нагрева изделий  $\tau_{\text{нг}}$ , должно быть достаточно для того, чтобы прогреть до заданной температуры загрузку и жароупорную тару, а также *компенсировать тепловые потери печи не только за время нагрева, но и за время остывания изделий в печи и за время простоя:*

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + P_{\text{п.т.ср.нг}} \tau_{\text{нг}} + P_{\text{п.т.ср.ост}} \tau_{\text{ост}} + P_{\text{п.т.ср.пр}} \tau_{\text{пр}}, \text{ Дж}. \quad (2.11)$$

В ф. (2.11) время берется в секундах.

Отметим, что потери за время выдержки не нуждаются в компенсации путем введения дополнительной энергии во время нагрева, поскольку при выдержке печь находится в тепловом равновесии с окружающей средой (мощность потерь равна вводимой в печь мощности).

Установленная мощность печи связана с потребной энергией выражением

$$P_{уст} = kQ_{потр}/\tau_{нг} = k(Q_{пол} + Q_{всп} + P_{п.т. ср. нг}\tau_{нг} + P_{п.т. ср. ост}\tau_{ост} + P_{п.т. ср. пр}\tau_{пр})/\tau_{нг}, \text{ Вт}, \quad (2.12)$$

где  $k$  – коэффициент запаса, который вводится для того, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу изделиям на первом этапе нагрева, также он учитывает ухудшение теплоизоляционных свойств футеровки в процессе эксплуатации, старение нагревателей и обеспечивает динамический запас мощности для обработки возмущений (таких, как снижение напряжения в сети относительно номинального, неплотно закрытая дверь и т.п.). Коэффициент запаса принимается равным 1,1–1,4 при позиционном регулировании температуры и 1,3–1,5 при непрерывном. Большее значение коэффициента запаса при непрерывном регулировании объясняется тем, что в этом случае регулятор будет снижать значение вводимой мощности относительно номинального еще до достижения температурой печи заданного значения, и поэтому для форсирования процесса нагрева необходимо ввести в печь дополнительную энергию в начале процесса. При этом чем меньше значение пропорциональной составляющей закона регулирования, тем большее значение коэффициента запаса принимается.

Значение коэффициента запаса также зависит от рабочей температуры печи и от массивности футеровки: чем выше температура и чем массивнее футеровка, тем большим следует принимать коэффициент запаса для уменьшения времени разогрева печи из холодного состояния.

Рассчитанное значение установленной мощности принято округлять до значения из ряда предпочтительных чисел, кратного 5 кВт.

Важными интегральными оценками энергетической эффективности печи являются *КПД* и *удельный расход электроэнергии* на единицу массы нагреваемых изделий. Удельный расход определяется как

$$W_{уд} = Q_{цикл}/(3,6 \cdot 10^6 \cdot G_{изд}), \text{ кВт} \cdot \text{час}/\text{кг}. \quad (2.13)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) печи равен

$$\eta = Q_{пол}/Q_{цикл}. \quad (2.14)$$

Если габариты рабочего пространства печи велики, то в печи выделяются тепловые зоны, каждая из которых имеет самостоятельное регулирование температуры со своим исполнительным устройством – регулятором мощности нагре-

вателей. Разбиение рабочего пространства на тепловые зоны позволяет обеспечить равномерное распределение температуры в печи. По высоте рабочего пространства тепловая зона должна занимать 1,5–2 м, по длине печи – обычно 2–2,5 м. Чем выше требования технологического режима к равномерности температурного поля, тем меньше размеры тепловых зон.

В печах с принудительной циркуляцией атмосферы разбиение на тепловые зоны неэффективно, равномерность температурного поля достигается организацией направленного движения газовой среды и увеличением скорости газового потока.

## 2.9. Особенности теплового расчета ЭПС непрерывного действия

В отличие от ЭПС периодического действия, в которых температуры в различных точках рабочего пространства должны быть одинаковыми, а температура каждой точки изменяется во времени, в печах непрерывного действия температура каждой точки неизменна во времени, но температура в рабочем пространстве изменяется по длине печи.

Для расчета длины рабочего пространства следует определить погонную загрузку, т.е. массу загрузки, проходящую на 1 м длины печи.

В случае насыпной загрузки без поддона (конвейерные печи) погонная загрузка определяется как

$$g = \gamma_v B h_n, \text{ кг/пм}, \quad (2.15)$$

где  $\gamma_v$  – объемная масса насыпной загрузки, кг/м<sup>3</sup> (см. табл. 2.2);  $B$  – ширина конвейерной ленты, м;  $h_n$  – толщина насыпи, м. Толщина насыпи выбирается проектировщиком. Во избежание значительных температурных перепадов в загрузке не рекомендуется принимать толщину насыпи более 60–80 мм (для стали).

В случае загрузки, перемещаемой в поддонах, погонная загрузка определяется как

$$g = n G_{\text{и. под}} / A, \text{ кг/пм}, \quad (2.16)$$

где  $n$  – количество поддонов по ширине печи;  $G_{\text{и. под}}$  – масса изделий в одном поддоне, кг (заданная или рассчитанная по геометрическим размерам и плотности загрузки или объемной массе насыпной загрузки);  $A$  – геометрический размер поддона в направлении движения (длина), м.

**Удельная объемная масса и эквивалентная теплопроводность  
немонолитных загрузок**

Вид загрузки	Удельная объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Эквивалентная теплопроводность, Вт/(м·°С)
Стальные мелкие болты и гайки $d = 12-25$ мм	1650...1800	4,65
Шарики стальные	4400	7,0–10,5
Ролики стальные	4500	8,1–11,6
Кольца подшипниковые стальные	1600	17,4–19,8
Стальная проволока в бунтах	–	2,3–3,5
Стопы стальных листов толщиной по 1 мм	–	0,47–0,58

В толкательных печах поддоны устанавливаются вплотную друг к другу. В печах других типов поддоны могут двигаться с интервалами. В этом случае значение погонной загрузки, полученное по формуле (2.16), необходимо умножить на поправочный коэффициент  $k_{и}$ , определяемый как

$$k_{и} = A / (A + \Delta), \quad (2.17)$$

где  $\Delta$  – интервал между поддонами, м.

В случае загрузки в виде отдельных изделий (не насыпной) без поддонов погонная загрузка также определяется по формулам (2.16), (2.17), только вместо массы изделий в поддоне, длины поддона и интервала между поддонами используются масса и длина изделия и интервал между изделиями.

Для барабанных печей погонная загрузка принимается равной 80–120 кг/пм.

Длина участка нагрева определяется как

$$L_{нг} = E \tau_{нг} / g, \text{ м}, \quad (2.18)$$

где  $E$  – заданная производительность печи, кг/ч;  $\tau_{нг}$  – время нагрева загрузки, ч;  $g$  – погонная загрузка, кг/пм.

Аналогично, но по времени выдержки и времени охлаждения, определяются длина участка выдержки  $L_{выд}$  и длина участка охлаждения  $L_{охл}$ , если такие стадии технологического процесса предусмотрены заданием.

Общая длина рабочего пространства определяется как

$$L = L_{нг} + L_{выд} + L_{охл}, \text{ м}. \quad (2.19)$$

При длине участка нагрева или выдержки более 3 м необходимо разделить участок по длине на тепловые зоны. Длина тепловой зоны составляет 1–3 м. Обычно длины тепловых зон в пределах участка выдержки или охлаждения при-

нимаются одинаковыми. Рекомендуется выбирать длину тепловой зоны в пределах 1,5–2,5 м. Это не означает, впрочем, что при длине участка нагрева, например, 2,6 м, его необходимо разделять на две зоны.

В любом случае для оценки правильности определения размеров рабочего пространства печи рекомендуется сравнить полученные размеры с данными серийных печей-прототипов того же конструктивного типа и схожей производительности [4].

В отличие от ЭПС периодического действия, тепловой режим печи периодического действия неизменен во времени, поэтому уравнение энергетического баланса для нее составляется не для количества теплоты за цикл, а для мощностей:

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{п.т.}}, \quad (2.20)$$

где  $P_{\text{эл}}$  – электрическая мощность, потребляемая нагревателями печи или зоны;  $P_{\text{пол}}$  – полезная мощность;  $P_{\text{всп}}$  – мощность, расходуемая на вспомогательные нужды;  $P_{\text{п.т.}}$  – мощность потерь тепла.

Составляющие энергетического баланса – полезная, вспомогательная мощность и мощность потерь тепла – рассчитываются отдельно для каждой тепловой зоны.

Полезная мощность, т.е. мощность, расходуемая на нагрев загрузки, определяется для каждой из зон нагрева как

$$P_{\text{пол}} = c_3 g L_{\text{зоны}} (t'' - t') / (3600 \cdot \tau_{\text{зоны}}), \text{ Вт}, \quad (2.21)$$

где  $c_3$  – удельная теплоемкость загрузки, Дж/(кг·°C);  $g$  – погонная загрузка, кг/пм;  $L_{\text{зоны}}$  – длина зоны, м;  $t''$  и  $t'$  – температура загрузки в конце и в начале зоны, °C;  $\tau_{\text{зоны}}$  – время нахождения загрузки в зоне, час.

Об определении температуры печи по зонам и температуры загрузки в конце каждой зоны подробно рассказано в [9].

Под вспомогательной мощностью понимается мощность, расходуемая на нагрев загружаемых в печь вместе с изделиями металлоконструкций (поддонов и т.п.)  $P_{\text{м}}$ , а для печей с контролируемой атмосферой с  $P_{\text{м}}$  суммируется мощность, расходуемая на нагрев газовой атмосферы,  $P_{\text{г}}$ . Мощность нагрева металлоконструкций определяется для каждой зоны как

$$P_{\text{м}} = c_{\text{м}} g_{\text{м}} L_{\text{зоны}} (t'' - t') / (3600 \cdot \tau_{\text{зоны}}), \text{ Вт}, \quad (2.22)$$

где  $c_{\text{м}}$  – удельная теплоемкость материала металлоконструкции (поддона), Дж/(кг·°C);  $g_{\text{м}}$  – погонная масса металлоконструкций, кг/пм. Температуры поддона в конце и в начале зоны  $t''$  и  $t'$  принимаются равными соответствующим температурам загрузки.

Погонная масса поддонов определяется как

$$g = k_{\text{и}} n G_{\text{пд}} / A, \text{ кг/пм}, \quad (2.23)$$

где  $n$  – количество поддонов по ширине печи;  $G_{\text{пд}}$  – масса одного поддона (без загруженных в него изделий!), кг;  $A$  – геометрический размер поддона в направлении движения (длина), м;  $k_{\text{и}}$  – коэффициент, определяемый по формуле (2.17),

учитывающий интервал между поддонами. Масса поддона в форме ящика, открытого сверху, определяется как

$$G_{\text{пл}} = [A \cdot B + 2 \cdot (A + B) \cdot H] \Delta_m \gamma_m, \text{ кг}, \quad (2.24)$$

где  $A, B, H$  – длина, ширина, высота поддона, м;  $\Delta_m$  – толщина стенки поддона, м;  $\gamma_m$  – плотность материала поддона (стали), кг/м<sup>3</sup>.

Мощность, расходуемая на нагрев металлоконструкций, обычно составляет 15–25 % от полезной мощности.

Мощность, расходуемая на нагрев газа, определяется как

$$P_{\text{г}} = c_{\text{г}} v_{\text{г}} \gamma_{\text{г}} (t_{\text{зоны}} - 20) / 3600, \text{ Вт}, \quad (2.25)$$

где  $c_{\text{г}}$  – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·°C);  $v_{\text{г}}$  – расход газа, м<sup>3</sup>/ч (приближенно оценивается как  $0,15E$ , где  $E$  – производительность печи, кг/ч);  $\gamma_{\text{г}}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $t_{\text{зоны}}$  – температура печи (зоны), °C. В качестве теплоемкости и плотности газа принимаются средние арифметические табличных значений, полученных при 20°C и при температуре печи.

Мощность тепловых потерь для каждой зоны определяется как

$$P_{\text{п.т}} = K_{\text{н.п}} (P_{\text{ф}} + P_{\text{пр}}), \text{ Вт}, \quad (2.26)$$

где  $P_{\text{ф}}$  – потери через футеровку;  $P_{\text{пр}}$  – потери через загрузочный и разгрузочный проемы (учитываются только для первой и последней зон печи);  $K_{\text{н.п}}$  – коэффициент неучтенных потерь, принимаемый в зависимости от типа печи (табл. 2.3). Значение  $K_{\text{н.п}}$  тем больше, чем существеннее тепловые короткие замыкания в конструкции печи.

Таблица 2.3

### Значения коэффициента неучтенных потерь для печей различных типов

Тип печи	Значение $K_{\text{н.п}}$
Толкательная	1,15...1,2
Конвейерная без поддерживающих роликов, барабанная, карусельная, туннельная	1,2...1,3
С шагающим подом, рольганговая, конвейерная с поддерживающими роликами	1,3...1,4

Мощность тепловых потерь через футеровку печи непрерывного действия рассчитывается так же, как для печей периодического действия.

Для первой и последней зон печи к потерям через футеровку следует прибавить потери через загрузочный и разгрузочный проемы, рассчитываемые так же, как для печей периодического действия. При наличии закрывающихся в ходе технологического процесса дверей (толкательные печи и печи с шагающим подом с большой периодичностью проталкивания, рольганговые с периодическим

перемещением загрузки) отдельно подсчитываются потери через открытую и закрытую дверь с учетом времени открытого состояния

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{откр}}\tau_{\text{откр}}/T_{\text{п}} + P_{\text{закр}}(T_{\text{п}} - \tau_{\text{откр}})/T_{\text{п}}, \quad (2.27)$$

где  $\tau_{\text{откр}}$  – продолжительность открытого состояния двери, с;  $\tau_{\text{закр}}$  – продолжительность закрытого состояния двери, с;  $T_{\text{п}} = \tau_{\text{откр}} + \tau_{\text{закр}}$  – периодичность проталкивания загрузки, определяемая как

$$T_{\text{п}} = (A + \Delta) \cdot (\tau_{\text{нг}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{охл}}) \cdot 3600/L, \text{ с}, \quad (2.28)$$

где  $A$  – геометрический размер поддона или изделия в направлении движения (длина), м;  $\Delta$  – интервал между поддонами или изделиями, м (в толкательных печах равен нулю);  $\tau_{\text{нг}}$ ,  $\tau_{\text{выд}}$ ,  $\tau_{\text{охл}}$  – время нагрева, выдержки и охлаждения, час;  $L$  – суммарная длина рабочего пространства печи, м.

Потери через закрытую дверь  $P_{\text{закр}}$  рассчитываются как потери через многослойную стенку, потери через открытую дверь  $P_{\text{откр}}$  – как потери излучением.

Установленная мощность зоны нагрева определяется как

$$P_{\text{уст}} = k(P_{\text{пол}} + P_{\text{м}} + P_{\text{г}} + P_{\text{п.т.}}), \text{ Вт}, \quad (2.29)$$

где  $k$  – коэффициент запаса, принимаемый из тех же соображений, что и для печей периодического действия.

Установленная мощность зоны выдержки определяется как

$$P_{\text{уст}} = k(P_{\text{г}} + P_{\text{п.т.}}), \text{ Вт}. \quad (2.30)$$

Для зон нагрева коэффициент запаса  $k$  принимается равным 1,1–1,2, для зон выдержки он существенно выше (1,4–1,6), поскольку при работе в установившемся режиме мощность, выделяемая нагревателями зоны выдержки, существенно меньше, чем в зонах нагрева (обеспечивает лишь компенсацию тепловых потерь). Только за счет увеличения коэффициента запаса для зон выдержки можно добиться того, чтобы температура зон выдержки при разогреве печи во время пуска не сильно отставала от температуры зон нагрева, а также обеспечить быструю отработку возмущений теплового характера.

Установленную мощность каждой из зон принято округлять до значения из ряда предпочтительных чисел, кратного 5 кВт.

Коэффициент полезного действия ЭПС непрерывного действия определяется как

$$\eta = P_{\text{пол}} / (P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{п.т.}}), \quad (2.31)$$

а удельный расход электроэнергии при производительности  $E$ , кг/час, равен

$$W_{\text{уд}} = (P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} + P_{\text{п.т.}}) / (10^3 \cdot E), \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{кг}. \quad (2.32)$$

## 2.10. Расчет нагревательных элементов ЭПС

Нагреватели являются важнейшими конструктивными элементами электропечей сопротивления. От их надежности в большой степени зависит надежность печи в целом. Работа нагревателей обычно происходит в тяжелых температурных условиях, часто при предельно допустимых для материала, из которого они выполнены, температурах. Поэтому, если срок службы остальных деталей и механизмов печи исчисляется многими годами, то нагревательные элементы выходят из строя и требуют замены уже через 1–2 года, а иногда и чаще.

Одним из основных факторов, обуславливающих срок службы нагревателя, является максимальная температура, при которой ему приходится работать. Температура нагревателей будет выше заданной конечной температуры нагрева изделий на величину температурного перепада нагреватель – изделие, зависящего от условий теплопередачи между ними. Следует избегать большого значения этой величины, так как при высоких рабочих температурах дополнительное повышение температуры нагревателей всего на несколько десятков градусов может существенно снизить срок их службы.

Поэтому правильный выбор материала и конструкции нагревательных элементов имеет большое значение при их эксплуатации с точки зрения расхода материала нагревателей.

Целью расчета нагревателей является выбор материала и определение геометрических размеров нагревательных элементов при известных размерах рабочего пространства печи и рабочей температуре. При этом необходимо обеспечить достаточный срок службы нагревательных элементов при выделении на них требуемой мощности.

Нагреватели низко- и среднетемпературных (до 1300°C) ЭПС изготавливаются, как правило, в виде проволочного или ленточного зигзага или проволочной спирали из *сплава сопротивления* (нихрома или железохромоалюминиевого сплава).

Расчет проволочных и ленточных нагревателей среднетемпературных печей (с теплопередачей преимущественно излучением) должен производиться в следующем порядке.

1. Выбирают материал для изготовления нагревательных элементов в соответствии с режимом работы печи (непрерывный, периодический) и значениями рекомендуемой и максимально допустимой температуры, особенностями рабочей среды (окислительная, восстановительная или защитная) (см. §2.2).

2. Задаются значением температуры нагревателя в работе. Температура нагревателя принимается на 30–50°C выше температуры печи (для печей непрерывного действия – температуры в конце зоны). Принятая температура нагревателя не должна быть выше рекомендуемой рабочей температуры сплава (табл. 1.3). Вместе с тем не всегда целесообразно использовать материалы, для которых допустима температура существенно выше принятой. Так, при температурах до 1000°C рекомендуется использовать тройной нихром Х15Н60, а не более дорогие двойные нихромы.

3. Далее необходимо определить *удельную поверхностную мощность* (мощность, выделяющуюся с единицы поверхности нагревателя), соответствующую принятой температуре нагревателя. Для нахождения удельной поверхностной мощности вводится понятие *идеального нагревателя*. Под идеальным понимают нагреватель, который образует с нагреваемым изделием две сплошные параллельные бесконечные поверхности при условии, что и нагреватель, и изделие имеют степень черноты 0,8, а тепловые потери равны нулю.

Удельная поверхностная мощность идеального нагревателя  $W_{ид}$  определяется только температурами нагревателя и тепловоспринимающей поверхности загрузки. Связь удельной поверхностной мощности реального нагревателя с  $W_{ид}$  осуществляется посредством поправочных коэффициентов, учитывающих геометрию нагревателя, размеры и степень черноты загрузки, способ регулирования мощности печи.

Значение удельной поверхностной мощности идеального нагревателя  $W_{ид}$ , Вт/м<sup>2</sup>, определяется по рис. 2.21 в зависимости от температуры тепловоспринимающей поверхности и принятой температуры нагревателя.

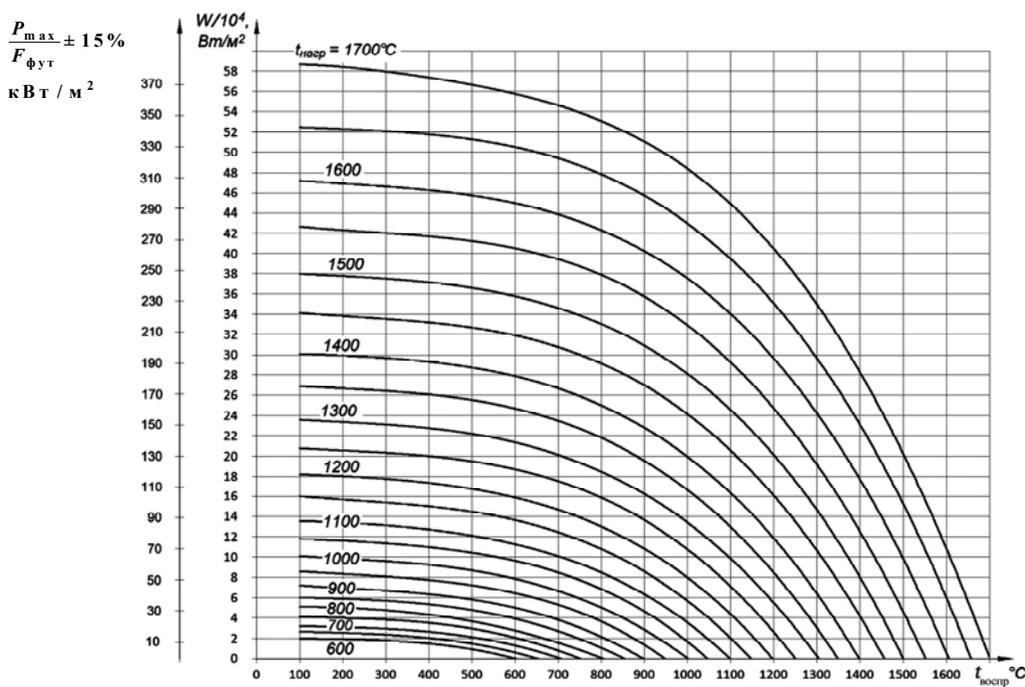


Рис. 2.21. Значения удельной поверхностной мощности идеального нагревателя  $W$  и максимальной мощности, размещаемой на 1 м<sup>2</sup> футеровки,  $P_{max}/F_{фут}$  в зависимости от температур тепловоспринимающей поверхности  $t_{востр}$  и нагревателя  $t_{нагр}$  (цифры на графиках)

4. Рассчитывается значение удельной поверхностной мощности реального нагревателя как

$$W = W_{\text{ид}} \alpha_{\text{эф}} \alpha_{\text{г}} \alpha_{\text{р}} \alpha_{\text{с}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.33)$$

где  $\alpha_{\text{эф}}$ ,  $\alpha_{\text{г}}$ ,  $\alpha_{\text{р}}$ ,  $\alpha_{\text{с}}$  – поправочные коэффициенты.

Значения коэффициента эффективности излучения  $\alpha_{\text{эф}}$  для различных конфигураций нагревателя (зигзаг, спираль) приведены в табл. 2.4. Наибольший коэффициент эффективности излучения ( $\alpha_{\text{эф}} = 0,68$ ) имеет проволочный зигзаг.

Коэффициент шага  $\alpha_{\text{г}}$  зависит от относительных витковых расстояний (рис. 2.22). Под ними понимается отношение расстояния между осями ветвей к диаметру проволоки  $e/d$  для проволочного зигзага или к ширине ленты  $e/b$  для ленточного зигзага и шага витков к диаметру проволоки  $t/d$  для проволочной спирали.

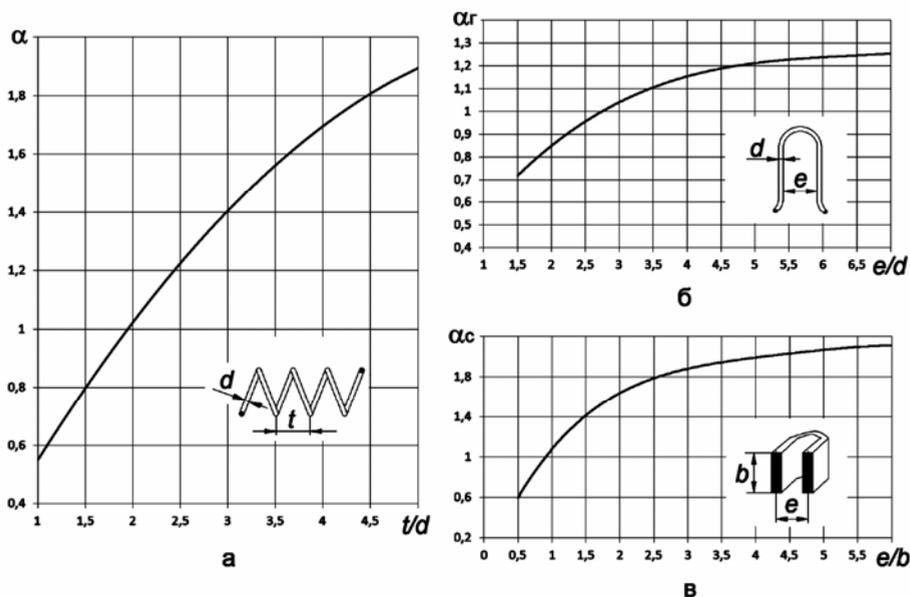


Рис. 2.22. Зависимость коэффициента  $\alpha_{\text{г}}$  от относительного виткового расстояния для проволочного спирального (а), проволочного зигзагообразного (б) и ленточного зигзагообразного (в) нагревателей

При минимальных относительных витковых расстояниях  $\alpha_{\text{г}} = 1$ . Оптимальными с точки зрения эксплуатационного расхода материала являются отношения  $e/d = 2,75 - 4,5$ ;  $e/b = 1,4 - 2,6$ ;  $t/d = 3,2 - 4,8$ . Никельсодержащие сплавы допускают меньшие витковые расстояния (меньше радиус изгиба, плотнее навивка спирали), чем безникелевые. Минимально допустимые по конструктивным соображениям относительные витковые расстояния приведены в табл. 2.4.

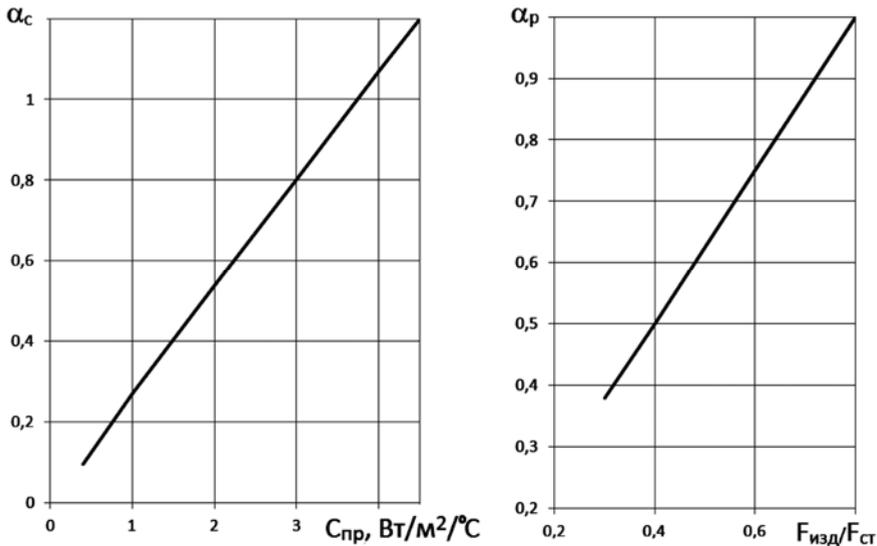
**Значения коэффициента эффективности излучения  $\alpha_{эф}$   
и минимального относительного виткового расстояния**

Система нагревателя	$\alpha_{эф}$	Минимальное относительное витковое расстояние
Проволочный зигзаг	0,68	2,75
Ленточный зигзаг	0,40	0,90
Проволочная спираль на полочке	0,32	2,00
Проволочная спираль на трубке	0,32	2,00

Коэффициент  $\alpha_c$  учитывает приведенный коэффициент излучения  $C_{пр}$  (рис. 2.23а). Приведенный коэффициент излучения определяется как

$$C_{пр} = \frac{5,67}{\frac{1}{\varepsilon_{изд}} + \frac{F_{изд}}{F_{ст}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{нг}} - 1 \right)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4), \quad (2.34)$$

где  $F_{изд}$  – тепловоспринимающая поверхность изделия,  $\text{м}^2$ ;  $F_{ст}$  – площадь тех поверхностей рабочей камеры печи, которые заняты нагревателями,  $\text{м}^2$ ;  $\varepsilon_{изд}$ ,  $\varepsilon_{нг}$  – степень черноты изделия и нагревателя соответственно.



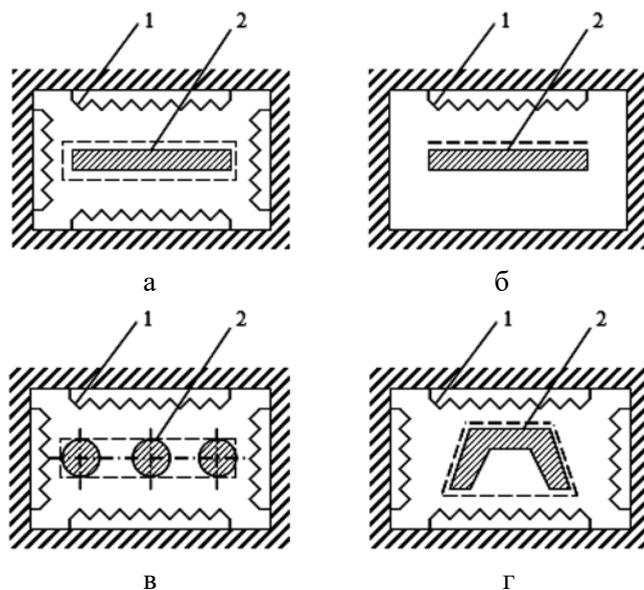
**Рис. 2.23. Зависимости коэффициента  $\alpha_c$   
от приведенного коэффициента излучения и коэффициента  $\alpha_p$   
от соотношения поверхностей изделия и стен камеры печи**

Коэффициент  $\alpha_p$  учитывает влияние размеров нагреваемых изделий и зависит от отношения  $F_{изд}/F_{ст}$  (рис. 2.23б).

Применительно к определению  $C_{пр}$  и  $\alpha_p$  под тепловоспринимающей поверхностью изделия  $F_{изд}$  понимается площадь поверхности изделия, обращенной к нагревателям (рис. 2.24, пунктир).

При  $F_{изд}/F_{ст} \geq 0,8$  следует принимать  $\alpha_p = 1$ .

При  $F_{изд}/F_{ст} \leq 0,3$  рассчитанное по данной методике значение удельной поверхностной мощности получается сильно завышенным. В этом случае при определении  $W_{ид}$  по графикам рис. 2.21 вместо температуры тепловоспринимающей поверхности берется температура печи, коэффициенты  $\alpha_c$  и  $\alpha_p$  принимаются равными единице.



**Рис. 2.24. К определению тепловоспринимающей поверхности плоской загрузки при двустороннем нагреве (а), плоской загрузки при одностороннем нагреве (б), загрузки сложной формы (в, г):**  
1 – нагреватели; 2 – нагреваемое изделие

Следует помнить, что для печей и зон, в которых разница температуры печи (зоны) и конечной температуры изделия невелика (печи периодического действия, за исключением специальных печей скоростного нагрева; зоны выдержки, регулируемого охлаждения и последние или единственные зоны нагрева печей непрерывного действия) в случае непрерывного регулирования температуры принимается  $\alpha_c = \alpha_p = 1$ . При позиционном регулировании для таких печей принимается  $\alpha_p = 1$ , а  $\alpha_c$  учитывается как обычно. Вид регулирования влияет на допустимое зна-

чение удельной поверхностной мощности, поскольку при позиционном регулировании вследствие колебаний температуры в квазиустановившемся режиме нагреватели работают в более тяжелых условиях.

Если разница температуры печи (зоны) и конечной температуры изделия значительна (печи скоростного нагрева; зоны нагрева печей непрерывного действия, за исключением последней зоны нагрева) учитываются все поправочные коэффициенты в формуле (2.33).

5. Определив удельную поверхностную мощность реального нагревателя, переходят к расчету электрических параметров. Задаются схемой включения нагревателей (треугольник или звезда), числом фаз, параллельных ветвей нагревательного элемента. Это оказывает влияние на массовый расход сплава сопротивления и срок службы нагревателя. Так, при расчете нагревателя на линейное напряжение массовый расход сплава на 44% ниже, чем в случае фазного напряжения, но сечение получается меньше, поэтому сокращается срок службы нагревателя, особенно для проволоки из никельсодержащих сплавов, у которой срок службы практически пропорционален диаметру.

6. Следующий этап заключается в определении геометрических размеров нагревателей и их массы.

Для проволочного нагревателя определяют диаметр проволоки. Выведем формулу для расчета диаметра проволоки, записав выражение для мощности нагревателя (одной фазы или одной из параллельно соединенных секций)

$$P = \frac{U^2}{L \cdot \rho \cdot \frac{1}{F}}, \text{ Вт}, \quad (2.35)$$

где  $U$  – напряжение фазы, В.;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала нагревателя при рабочей температуре, Ом·м;  $L$  – развернутая длина нагревателя фазы или секции, м;  $F$  – площадь поперечного сечения проволоки, м<sup>2</sup>.

С другой стороны, та же самая мощность может быть записана как

$$P = WF_{\text{пов}}, \text{ Вт}, \quad (2.36)$$

где  $F_{\text{пов}}$  – площадь поверхности проволоки, м<sup>2</sup>.

Записывая  $F$  и  $F_{\text{пов}}$  через диаметр проволоки  $d$ , м ( $F = \pi d^2/4$ ;  $F_{\text{пов}} = \pi dL$ ), и подставляя в ф. (2.35), (2.36), выразим из этих формул развернутую длину нагревателя  $L$

$$L = \pi U^2 d^2 / (4\rho P), \text{ м}, \quad (2.37)$$

$$L = P / (\pi W d), \text{ м}. \quad (2.38)$$

Приравняв правые части ф. (2.37) и (2.38) и выполнив простые преобразования, получим выражение для диаметра проволоки

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot W}}, \text{ м}. \quad (2.39)$$

Для ленточного нагревателя задаются отношением сторон ленты  $b/a = m$  (обычно используется лента с  $m = 10$ ) и рассчитывают меньшую сторону сечения  $a$ :

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot P^2}{2m(m+1) \cdot U^2 \cdot W}}, \text{ м.} \quad (2.40)$$

Формула (2.40) выводится аналогично ф. (2.39) для проволоки.

Напомним, что при трехфазном подключении нагревателей в формулах (2.39), (2.40) вместо  $P$  подставляется мощность фазы, т.е.  $1/3$  установленной мощности печи или зоны.

При этом следует помнить, что окончательный выбор размеров проволоки или ленты проводится из стандартного ряда диаметров проволоки (от 2 до 20 мм) или толщины ленты (от 1,5 до 3,0 мм), приведенного в [4]. Не рекомендуется использовать проволоку диаметром менее 2,5 мм и более 11 мм, а для безникелевых (железохромомолибденовых) сплавов – более 8 мм. Если диаметр нагревателя слишком мал, то следует либо понизить напряжение, либо принять меньшую температуру нагревателя и, как следствие, меньшую удельную поверхностную мощность  $W$  (это видно из формул (2.7), (2.8)). При слишком большом диаметре можно рекомендовать повышение напряжения путем перехода к подключению на линейное напряжение.

Полученное по формулам (2.39), (2.40) значение диаметра или толщины ленты следует округлить до ближайшего большего значения из стандартного ряда. Округление именно в большую сторону связано с тем, что при этом боковая поверхность нагревателя получается несколько больше расчетной, следовательно, удельная поверхностная мощность – несколько меньше расчетной, а значит, температура нагревателя не превысит принятую.

Развернутую длину  $L$  и массу  $G$  нагревателя одной фазы (секции) можно определить как

$$\begin{aligned} L &= \frac{U^2 \cdot F}{\rho \cdot P}, \text{ м;} \\ G &= \gamma FL, \text{ кг,} \end{aligned} \quad (2.41)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения нагревателя,  $\text{м}^2$  ( $F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  для проволоки,  $F = m \cdot a^2$  для ленты);  $\gamma$  – плотность материала нагревателя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Однако для удобства оценки влияния мощности, напряжения, удельной поверхностной мощности нагревателя на длину  $L$  и массу  $G$  нагревателя приведем другие выражения для  $L$  и  $G$ , полученные из формул (2.39), (2.40).

Для проволочного нагревателя:

$$L = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\pi\rho W^2}}, \text{ м};$$
$$G = 0,1\gamma^3 \sqrt[3]{\frac{6,3\rho \cdot P^5}{U^2 W^4}}, \text{ кг.}$$
(2.42)

Аналогично для ленточного нагревателя:

$$L = \sqrt[3]{\frac{2,5PU^2 m}{(m+1)^2 W^2 \rho}}, \text{ м};$$
$$G = \gamma^3 \sqrt[3]{\frac{0,63\rho \cdot P^5 m^2}{U^2 W^4 (m+1)^4}}, \text{ кг.}$$
(2.43)

7. Далее производится размещение нагревателей в рабочем пространстве печи. При этом следует учитывать ограничения на высоту зигзага и диаметр спирали, а для безникелевых сплавов при температурах, близких к предельным, также учитывать крип (удлинение нагревателей при разогреве), который может достигать 40%, в этом случае расстояние между рядами нагревателя должно быть не менее половины высоты зигзага или диаметра спирали, по краям рабочего пространства необходим запас на удлинение нагревателя. Диаметр спирали не должен превышать 10 диаметров проволоки для никельсодержащих сплавов и 7 диаметров проволоки для безникелевых, высота проволочного зигзага не должна превышать 400 мм, высота ленточного зигзага рекомендуется не более  $100a$ , где  $a$  – толщина ленты.

Если рассчитанные нагреватели не удастся разместить в печи (развернутая длина слишком велика), необходимо провести расчет нагревателей заново, снизив питающее напряжение. Оно может изменяться в диапазоне от 380 В до нескольких вольт за счет изменения схемы включения нагревателей или питания их через понижающий трансформатор. При непрерывном регулировании температуры (используется тиристорный регулятор напряжения) можно обойтись без понижающего трансформатора: для снижения действующего значения напряжения ограничивается минимальный угол открывания тиристоров. При этом должно осуществляться фазоимпульсное регулирование (не широтно-импульсное). Такой способ применим, если напряжение нужно понизить не очень значительно.

С точки зрения экономии материала нагревателя выгодно применять более высокое напряжение, дробить мощность печи (увеличивать число параллельных ветвей нагревателей), переходить на более жаростойкий материал с большим сроком службы, заменять проволочные нагреватели ленточными.

Для облегчения размещения нагревателей в печи следует применять пониженное питающее напряжение, увеличивать мощность отдельных ветвей, использовать однофазное подключение. В большинстве случаев проволочные нагреватели размещаются легче, чем ленточные.

Изложенная методика расчета нагревателей среднетемпературных печей может применяться и к низкотемпературным печам, разница заключается в определении удельной поверхностной мощности нагревателя, поскольку в низкотемпературных печах теплопередача осуществляется преимущественно конвекцией (§1.1).

## 2.11. Электрооборудование ЭПС и автоматическое регулирование температурного режима ЭПС

**Электропитание** ЭПС осуществляется от сети переменного тока промышленной частоты 50 Гц. Питание ЭПС постоянным или выпрямленным током возможно, но не рационально. Как известно, преобразование электрической энергии в тепловую обеспечивается с коэффициентом полезного действия 100% независимо от рода тока. Система электропитания ЭПС переменным током оказывается более простой и дешевой, поскольку не требует дополнительного преобразователя переменного напряжения в постоянное. Регулирование температурного режима работы ЭПС осуществляют путем изменения вводимой в нее электрической мощности. В качестве регуляторов переменного напряжения для ЭПС первоначально применялись регулируемые трансформаторы, магнитные усилители и тиристоры [5]. Очевидно, что такие преобразователи обладали низким быстродействием, плохими регулировочными и эксплуатационными характеристиками. Положение кардинально изменилось с разработкой в 60-х гг. прошлого века **тиристоров**, которые позволили создать широкую гамму регулируемых источников питания как переременного, так и постоянного тока. Начиная с этого времени основным типом регулируемого источника питания ЭПС, является **тиристорный преобразователь переменного тока, преобразующий нерегулируемое переменное напряжение питающей сети в регулируемое переменное напряжение той же частоты**. В этот период совершенствовались и другие элементы автоматики, на основе которых выполняются системы регулирования температуры ЭПС.

Система электропитания и автоматического регулирования температуры ЭПС в настоящее время выполняется по схеме, приведенной на рис. 2.25, которая включает в себя следующие функциональные элементы.

Основным силовым функциональным элементом системы регулирования температуры является регулятор напряжения РН, подключенный силовыми входами к сети переменного напряжения  $U_c$ , а силовыми выходами – к нагревателям электрической печи сопротивления ЭПС, на которые подается регулируемое напряжение  $U_n$ . Регулирование угла включения тиристоров РН осуществляется

системой импульсно-фазового управления СИФУ, подключенной выходами к управляющим входам тиристоров регулятора напряжения, а входом – к выходу микропроцессорного регулятора температуры МПР.

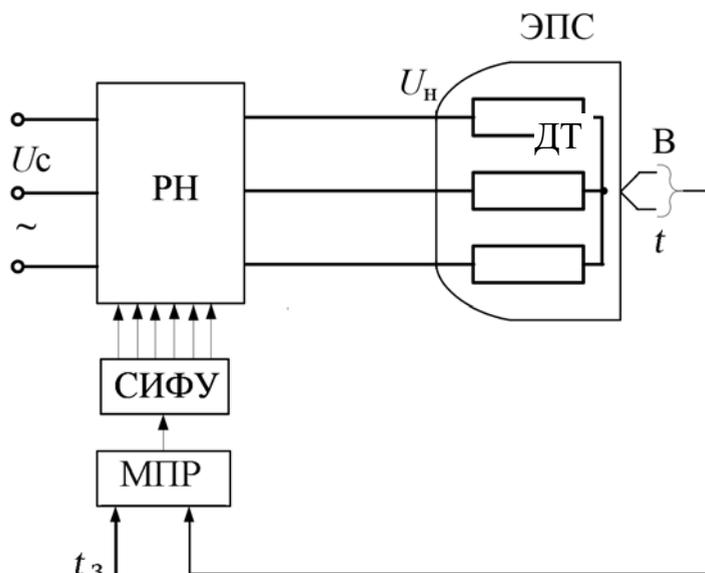


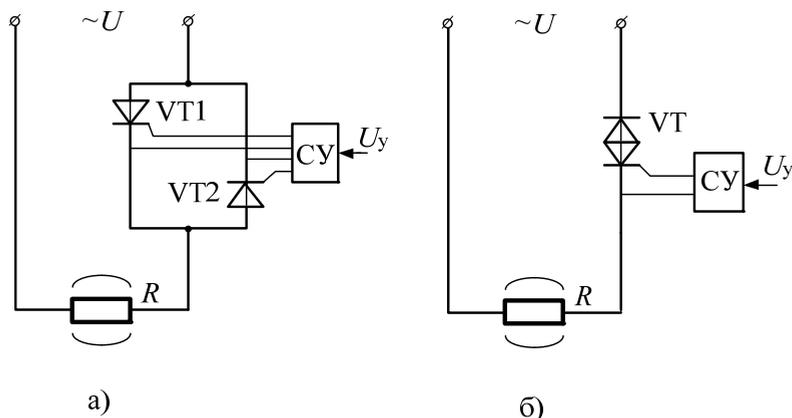
Рис. 2.25. Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры ЭПС

Микропроцессорный регулятор температуры вырабатывает закон управления тиристорами, обеспечивающий требуемое качество и точность регулирования температуры печи  $t$ . Автоматическое регулирование и поддержание заданного значения температуры печи  $t_3$  обеспечивается использованием принципа отрицательной обратной связи по температуре  $t$ , сигнал, пропорциональный которой, вырабатывается датчиком температуры (термопарой) ДТ, установленным внутри печи. Микропроцессорный регулятор температуры МПР сравнивает заданное  $t_3$  и текущее  $t$  значения температуры и в зависимости от знака рассогласования увеличивает или уменьшает поступающее на нагреватели напряжение  $U_n$ .

Рассмотрим принципы построения и электрические схемы элементов, образующих автоматический регулятор температуры.

**Тиристорные регуляторы напряжения** принято классифицировать по числу фаз питающего напряжения и нагрузки и способу управления тиристорами. Основу силовых схем тиристорных регуляторов напряжения составляет приведенная на рис. 2.26 однофазная схема, которая выполняется на двух встречно-параллельно включенных тиристорах (рис. 2.26а) или одном симисторе (рис. 2.26б) [5]. *Симистором* (или симметричным тиристором) называют полу-

проводниковый прибор, у которого в одном корпусе объединены два встречно-включенных тиристора с одним, общим для обеих структур, управляющим электродом. Тиристор, как и симистор, являются не полностью управляемыми ключевыми элементами.



**Рис. 2.26. Базовая схема однофазного тиристорного регулятора на основе двух встречно-параллельно включенных тиристорov (а) и симистора (б)**

Управляемым для тиристора  $VT1$  (или  $VT2$ ) является только процесс его включения, когда на управляющий переход от системы управления  $СУ$  по команде управления  $U_y$  поступает отпирающий импульс напряжения. Включение (отпирание) тиристора (как и симистора) при положительном напряжении на силовых электродах происходит за несколько микросекунд, после чего управляющий импульс может быть снят, а включенное состояние тиристора поддерживается благодаря наличию в его структуре внутренней положительной обратной связи. При включенном тиристоре к нагрузке  $R$  прикладывается напряжение, близкое к напряжению источника питания  $U$ , поскольку падение напряжения на силовом переходе открытого тиристора не превышает 1 В. Параметры отпирающих импульсов в зависимости от мощности составляют: напряжение  $u_{отп} = 4 - 6$  В, ток  $i_{отп} = 10 - 400$  мА. Допустимое напряжение (действующее значение) на силовых электродах тиристора достигает 2000 В, а действующее значение тока – 2000 А в одном элементе.

Процесс запираания (отключения) тиристора является неуправляемым, поскольку, как уже отмечалось, снятие управляющего сигнала не приводит к отключению тиристора. Для запираания тиристора (так называемого восстановления управляющих свойств) необходимо выполнение следующих условий: отсутствие сигнала на управляющих электродах тиристора; изменение полярности напряжения на силовых электродах тиристора; отсутствие тока в силовом пере-

ходе тиристора. Причем для полного восстановления управляющих свойств тиристора указанные выше условия должны выполняться в течение *времени восстановления*  $t_b$ , которое для различных типов тиристорov может изменяться от 25 до 200 мкс. В регуляторах переменного напряжения условия запираения тиристора выполняются автоматически при переходе питающего напряжения через ноль, в то время как в регуляторах постоянного напряжения для запираения тиристора используют специальные схемы искусственной коммутации [6].

**Многофазные тиристорные преобразователи** переменного напряжения (в основном трехфазные) выполняются по схемам, приведенным на рис. 2.27. В каждую фазу многофазной нагрузки  $R$  (предполагается, что это нагреватели трехфазной ЭПС) включаются два встречно-параллельно соединенных тиристора или один симистор аналогично схемам рис. 2.26. Приведенные на рис. 2.27 схемы аналогичны по принципу действия и характеристикам и различаются только местом включения нагрузки  $R$ . Так, в схеме рис. 2.27а нагрузка  $R$  включена в звезду с изолированной нейтралью, что позволяет использовать три провода, соединяющих нагрузку с тиристорами преобразователя. В схеме рис. 2.27б для подключения нагрузки к тиристорам преобразователя необходимо использовать уже шесть проводов, что можно рассматривать как основной недостаток этой схемы.

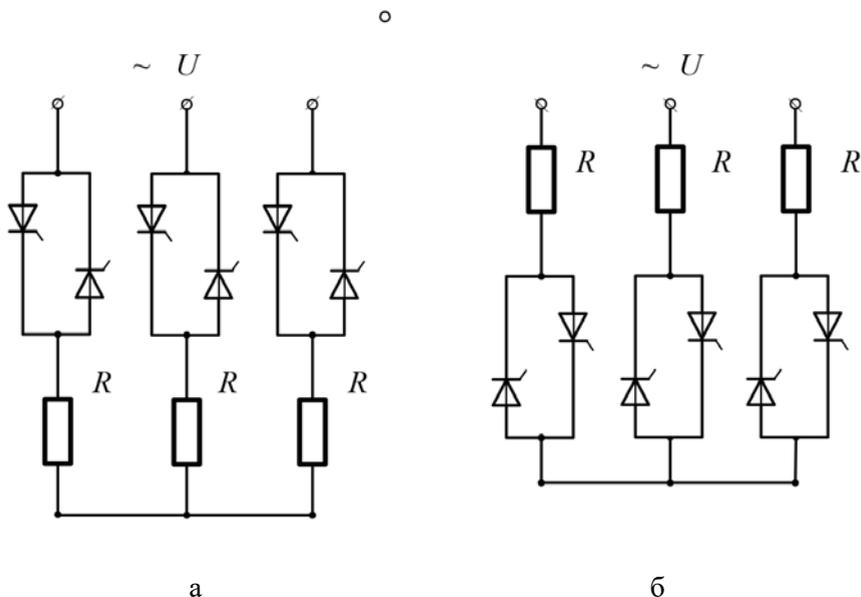


Рис. 2.27. Трехфазные схемы силовой части тиристорных преобразователей с нагрузкой, включенной в катодную область тиристорov (а) и анодную область тиристорov (б)

По остальным показателям обе приведенные на рис. 2.27 схемы равноценны. Для управления тиристорами преобразователя напряжения система управления СУ должна иметь шесть потенциально разделенных каналов и сфазирована с питающим напряжением  $U$ . Для упрощения схем эти элементы на рис. 2.27 не показаны. Симметричная нагрузка в трехфазных преобразователях может быть включена, как в звезду, так и в треугольник.

Для несимметричной трехфазной нагрузки в схемы преобразователей, приведенных на рис. 2.27, вводится соединение общей точки нагрузки  $R$  с нулевым проводом  $N$ , как это показано на рис. 2.28. Тиристоры преобразователя подключаются к фазным клеммам  $A, B, C$  питающей сети. Такая схема преобразователя допускает работу тиристоров как на нагрузку с различными величинами сопротивлений  $R$  в фазах, так и отдельную работу тиристоров в каждой фазе, т.е. обладает большим набором функциональных возможностей в сравнении со схемами рис. 2.27. В тоже время по регулировочным и энергетическим характеристикам приведенные на рис. 2.27 и рис. 2.28 схемы аналогичны.

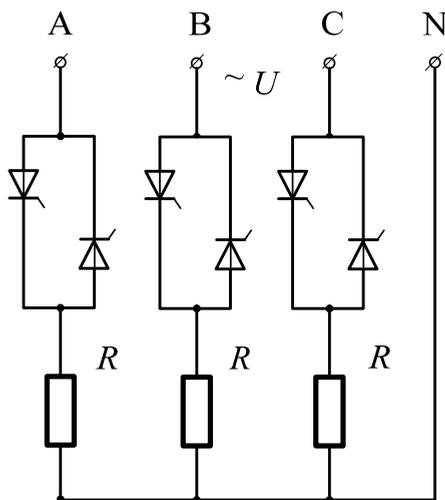


Рис. 2.28. Трехфазная схема силовой части тиристорного преобразователя с нагрузкой, соединенной в звезду с нулевым проводом

**Способ управления тиристорами** оказывает существенное влияние на характеристики регулятора переменного напряжения. В настоящее время используются следующие способы управления тиристорами [6]:

– релейное управление тиристорами, не синхронизированное с питающим напряжением в режиме бесконтактного переключателя (контактора), при этом реализуется так называемое **двухпозиционное регулирование температуры** (нагреватели печи отключаются от питающей сети при превышении температурой заданного значения и вновь подключаются на полную мощность при снижении температуры ниже задания);

- релейное управление, но с включением тиристорov в моменты перехода питающего напряжения через ноль в режиме бесконтактного переключателя;
- широтно-импульсное управление тиристорами, синхронизированное с напряжением питающей сети;
- фазоимпульсное управление тиристорами с регулированием угла включения тиристорov (с задержкой включения тиристора относительно момента перехода через ноль питающего напряжения).

Широтно-импульсное и фазоимпульсное управление тиристорами позволяют реализовать **непрерывное регулирование температуры**, осуществляемое за счет плавного или с малой дискретностью изменения вводимой мощности. Непрерывное регулирование сложнее двухпозиционного в реализации, но обеспечивает более высокую точность поддержания температурного режима.

**Конструктивное исполнение тиристорных преобразователей переменного напряжения.** Тиристорные преобразователи напряжения выпускаются отечественными и зарубежными фирмами [7] в различных модификациях в виде функционально законченного устройства, предназначенного для управления одно- и многофазной нагрузкой (электрическими печами сопротивления, электродвигателями и т. д.). Типовой набор комплектации и выполняемых функций включает в себя:

- полностью комплектное устройство со степенью защиты IP41;
- микропроцессорная система управления;
- индикация параметров на жидкокристаллическом дисплее;
- программирование и запись настроек кнопками с панели управления;
- электронная защита от короткого замыкания, перегрузки, потери фазы;
- защита от несимметрии токов (обрыва или повреждения нагрузки);
- автодиагностика тиристорov;
- индикация фазных токов нагрузки на дисплее;
- управление мощностью фазоимпульсным способом и методом пропуска периодов;
- кнопка аварийного останова.

**Тиристорные преобразователи на твердотельных реле.** Сравнительно недавно промышленностью освоены новые модификации тиристорных преобразователей, получивших название **твердотельные реле** [7]. *Электронные твердотельные реле* представляют собой новый класс модульных полупроводниковых устройств, изготовленных по гибридной технологии. Система управления обеспечивает гальваническую развязку входных и силовых цепей через оптронную пару, на светодиод которой подается управляющий сигнал, а выходная фотодиодная матрица управляет силовыми ключевыми элементами.

Твердотельные реле классифицируют по следующим признакам:

- по типу нагрузки – на переменного (одно- и трехфазные) и постоянного тока;

– по методу управления – на устройства с контролем перехода питающего напряжения через ноль для коммутации емкостной нагрузки; устройства *мгновенного* включения (без синхронизации с напряжением питающей сети); устройства с фазоимпульсным управлением.

Схема подключения твердотельного реле ТТР к нагрузке  $R$  переменного тока приведена на рис. 2.29. На схеме отражена особенность, присущая тиристорным переключателям данного типа – наличие оптронной развязки между управляющими сигналами и цепью нагрузки, осуществляемой с помощью оптопары через световой поток светодиода, на схему управления которым поступает сигнал управления  $U_y$ . Управление твердотельными реле осуществляется сигналом постоянного тока с напряжением 3–32 В. Напряжение на нагрузке лежит в диапазоне 24–480 В, а выходной ток достигает 100 А.

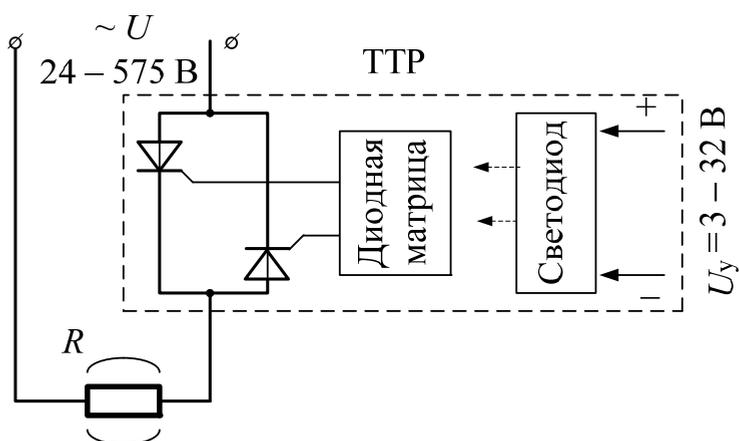


Рис. 2.29. Схема подключения твердотельного реле к нагрузке переменного тока

**Микропроцессорные регуляторы температуры (МПР) ЭПС** относятся к классу *специализированных предметно-ориентированных* вычислительных устройств, т.е. вычислительных устройств, программное обеспечение которых (для упрощения программирования и снижения стоимости) предполагает решение определенного класса задач (выполнение определенного алгоритма управления). Предметная ориентация МПР не означает, что он может использоваться только, например, для регулирования температуры. Этот МПР может управлять и другими объектами, требующими аналогичного *алгоритма управления*. Специфика МПР температуры сводится к тому, что его входы согласуются с определенным типом датчика температуры. Часто такое согласование организуют программным путем внутри МПР, расширяя, тем самым, его области применения.

Микропроцессорные регуляторы температуры делятся на следующие классы.

**1. Простейший класс МПР** температуры – это стабилизаторы температуры с релейным выходом на контактных реле (для управления контакторами или тиристорными переключателями) или аналоговым выходом для управления тиристорными регуляторами с фазоимпульсным управлением. В этих устройствах обеспечивается ручное задание температуры, изменить которое может только оператор. В процессе работы регулятора температуры задание не изменяется. С передней панели МПР задаются и выводятся на дисплей: температура и параметры ПИД-регулятора, которые сохраняются и при отключении питания контроллера. На рисунке 2.30 приведена функциональная схема простейшего регулятора температуры ТРМ-1 производства компании «ОВЕН».

Регулятор температуры имеет один универсальный вход для подключения следующих датчиков температуры:

- термопреобразователей сопротивления типа ТСМ или ТСП 50/100, Pt100;
- термопар ТХК, ТХА, ТНН, ТЖК, ТПП (S), ТПП (R), ТВР (А-1, 2, 3), ТПР (В), ТМК (Т);
- активных датчиков с унифицированным сигналом тока 0...5 мА, 0(4)...20 мА или напряжения –50 ...+50 мВ, 0...1 В.

Логическое устройство прибора (ЛУ) может работать в одном из трех режимов:

- двухпозиционный регулятор (компаратор, устройство сравнения);
- непрерывный пропорциональный (П) регулятор;
- регистратор.

В регулятор температуры ТРМ1 могут быть установлены следующие выходные устройства (ВУ):

- цифроаналоговый преобразователь выходного сигнала ЛУ в ток 4...20 мА или напряжение 0...10 В с питанием от внешнего источника;
- ВУ дискретного типа – электромагнитное реле 8 А, транзисторная или симисторная оптопара, выход для управления внешним твердотельным реле.

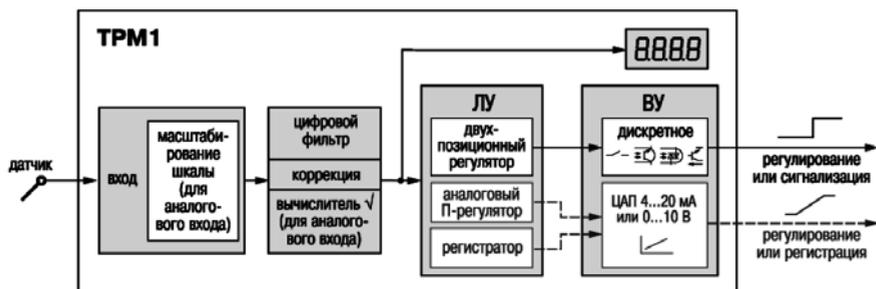


Рис. 2.30. Функциональная схема регулятора температуры ОВЕН ТРМ 1

Кроме того, прибор ТРМ-1 имеет возможность управления трехфазной нагрузкой. Для этого в прибор устанавливается ВУ, представляющее собой три симисторных оптопары со схемами контроля перехода напряжения через ноль.

Модификации регулятора температуры могут включать в себя как один установленный в корпусе МПР, так и два автономно работающих МПР, установленных в одном корпусе (например, 2ТРМ1), что позволяет устройству параллельно регулировать температуры двух объектов, например, двух тепловых зон печи.

2. **МПР с программным заданием** температуры обеспечивает не только измерение и регулирование температуры, но и изменение ее во времени по заданному закону. В таких МПР помимо основной программы вычисления управляющего воздействия по заданному закону вводится дополнительная программа изменения заданного значения температуры  $t_3$  во времени. Программирование графика изменения температуры во времени (рис. 2.31) осуществляется посредством задания координат точек  $(t, \tau)$ , число которых может достигать нескольких десятков. На рисунке 2.31 приведен пример графика  $t_3(\tau)$ , включающий в себя 4 участка. При программировании кривой  $t_3(\tau)$  оператор с помощью выведенных на переднюю панель МПР кнопок перемещения последовательно задает значения температуры  $t_i$  и времени  $\tau_i$ . Регуляторы температуры такого класса целесообразно использовать для управления процессом нагрева в ЭПС изделий и материалов, требующих нагрева с заданной скоростью и выдержки при постоянной температуре в течение определенного времени. К таким технологическим процессам относятся, например, процессы отжига различных электротехнических материалов, термообработки оптических стекол и др.

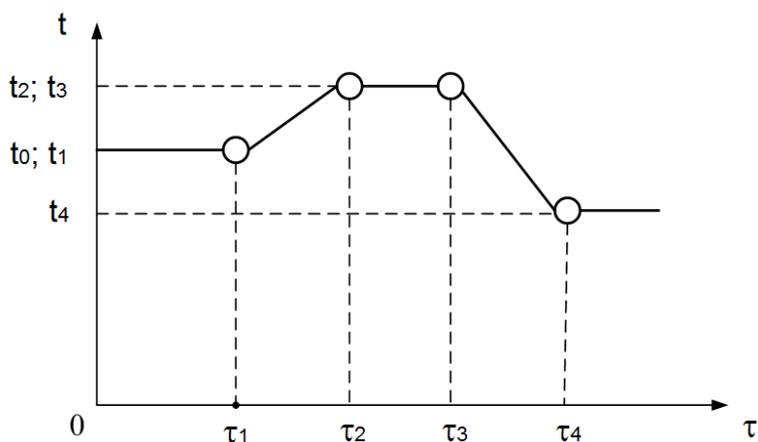


Рис. 2.31. Пример кривой программного задания температуры  $t_3(\tau)$

3. *Адаптивный МПР* температуры характеризуется наличием дополнительной программы, обеспечивающей автоматическое изменение параметров (параметрическую *адаптацию*) пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора под реальные параметры объекта управления – коэффициент передачи и постоянную времени ЭПС. Типичным представителем такого класса МПР является регулятор ОВЕН ТРМ-210 [8].

## 2.12. Пути рациональной эксплуатации ЭПС, повышения энергетической эффективности

Как на стадии проектирования печи, так и в процессе ее эксплуатации, могут быть проведены мероприятия, позволяющие улучшить надежность печной установки, повысить ее производительность и энергетическую эффективность. Такие мероприятия направлены на:

- обеспечение надежности работы печей;
- повышение производительности печей;
- уменьшение тепловых потерь;
- уменьшение количества аккумулированного тепла;
- рекуперацию тепловой энергии;
- организацию групповой работы печей периодического действия;
- уменьшение влияния регуляторов мощности на питающую сеть.

### ***Обеспечение надежности работы печей***

Надежность печи определяется, главным образом, стойкостью нагревателей и жароупорных деталей.

Меры по повышению надежности:

1. Правильный расчет и эксплуатация нагревателей, их работа при рекомендуемых, а не максимально допустимых температурах. Следует помнить, что при температурах, близких к предельным, увеличение температуры нагревателя даже на 10–20°C существенно снижает срок его службы.

2. Правильный выбор марок жароупоров.

3. Предпочтительное использование литых изделий при высоких температурах (так, в конвейерных печах при 900°C срок службы литых звеньев конвейера до 3 лет против 6 месяцев для штампованных при увеличении массы всего на 50–100%, что экономически вполне оправданно).

### ***Повышение производительности печей***

Производительность печи существенно влияет на КПД и удельный расход электроэнергии, поскольку полезное тепло пропорционально производительности, а тепловые потери в большей своей части постоянны.

Производительность печи может быть увеличена:

- сокращением времени нахождения изделий в печи (сокращением времени нагрева для печей периодического действия, увеличением скорости перемещения для печей непрерывного действия);
- увеличением загрузки пода.

Сокращение времени нагрева может быть достигнуто только увеличением температуры печи. Однако следует помнить, что для массивных изделий ускорение нагрева может привести к возникновению недопустимо больших температурных перепадов по сечению изделия.

Загрузка пода должна увеличиваться за счет аккуратной, равномерной укладки изделий, но не за счет увеличения толщины их слоя в направлении теплового потока, иначе производительность даже снизится (при нагреве массивных изделий повышение толщины слоя вызывает увеличение времени нагрева, пропорциональное квадрату этого повышения).

Увеличение толщины слоя изделий может повысить производительность печи, если значительную часть технологического цикла занимает выдержка при постоянной температуре.

В печах с принудительной циркуляцией атмосферы для увеличения производительности целесообразно увеличивать загрузку пода, но при условии свободного обдува изделий.

#### ***Уменьшение потерь тепла***

Следует помнить, что использование более дорогих теплоизоляционных материалов с меньшей теплопроводностью окупается.

Окраска наружных поверхностей печей алюминиевой краской снижает потери тепла на 2–3% за счет уменьшения степени черноты поверхностей.

Необходимо тщательно следить за уплотнением отверстий.

В конструкциях печей нужно сводить к минимуму тепловые короткие замыкания.

#### ***Уменьшение количества аккумулированного тепла***

Уменьшение массы футеровки и, следовательно, аккумулированного ею тепла, позволяет улучшить динамические показатели печи (уменьшить время разогрева) и снизить удельный расход электроэнергии (в особенности для печей периодического действия, остывающих после каждого цикла работы).

Достигается такой эффект за счет использования легковесных и волокнистых (ультралегковесных) футеровочных материалов – огнеупорных и теплоизоляционных. В настоящее время в конструкциях печей периодического действия все реже используются плотные теплоизоляционные материалы (например, диатомит), вытесняемые различными минеральными ватами низкой плотности. Расширяется применение волокнистых огнеупорных материалов, в том числе, на основе муллито-кремнеземистого волокна.

При проектировании печей периодического действия считается целесообразным выполнить футеровку менее массивной, чтобы уменьшить количество тепла, аккумулируемое футеровкой, пусть даже за счет некоторого увеличения тепловых потерь.

Хорошим индикатором того, что футеровка печи спроектирована рационально, является температура кожуха печи в установившемся режиме. Температура кожуха, согласно нормам безопасности, не должна превышать 60°C, однако, если она меньше 45°C, то это свидетельствует о том, что футеровка выполнена чересчур массивной, а это нерационально.

### ***Рекуперация тепловой энергии***

Тепло, накопленное конструкцией печи (и тарой) в предыдущем цикле нагрева, должно максимально использоваться при нагреве последующей загрузки.

Пути повышения степени рекуперации тепла:

- сокращение простоев печи, времени загрузки и выгрузки (за счет механизации, автоматизации, организации работ);
- максимально быстрая перезагрузка тары (поддонов) в печах непрерывного действия;
- рециркуляция воздуха в печах с принудительной циркуляцией атмосферы и печах с псевдокипящим слоем;
- *организация медленного остывания изделий, требуемого технологическим процессом, не в камере нагрева, а в отдельной камере.* Например, при отжиге крупногабаритных валов в шахтной печи КПД составляет порядка 0,4 в случае остывания валов в печи, 0,8 – при остывании в отдельном колодце.

При использовании контролируемой атмосферы, если горячее изделие нельзя переносить по воздуху в отдельную камеру охлаждения, применяются:

- колпаковые муфельные печи с переносом горячего нагревательного колпака после окончания нагрева и выдержки на другой стенд с загрузкой, аналогичное действие возможно и при использовании элеваторных печей;
- отдельные камеры охлаждения в вакуумных печах, в которые изделия шлюзуются для охлаждения из основной камеры печи.

### ***Организация групповой работы печей периодического действия***

Мощность, потребляемая печами периодического действия, в отличие от печей непрерывного действия, не постоянна во времени, а существенно изменяется в ходе технологического цикла, включающего, в общем случае, стадии нагрева, выдержки, охлаждения и простоя. Наибольшая мощность (номинальная) потребляется в начальный период нагрева, затем она снижается и во время выдержки составляет лишь величину, необходимую для компенсации тепловых потерь. При неконтролируемом охлаждении потребляемая мощность равна нулю.

С целью выравнивая суммарной кривой энергопотребления группой печей периодического действия (когда, например, в цехе работают несколько печей) стараются сместить технологические циклы отдельных печей во времени таким образом, чтобы периоды наибольшего энергопотребления (периоды нагрева) не совпадали.

### *Уменьшение влияния регуляторов мощности печей сопротивления на питающую сеть*

Естественный  $\cos\varphi$  ЭПС косвенного нагрева близок к 1. Однако при работе систем непрерывного регулирования температуры, в которых исполнительными устройствами являются тиристорные регуляторы напряжения, возникают искажения кривой тока, снижающие коэффициент мощности. Напомним, что коэффициент мощности  $\chi$  представляет собой произведение  $\cos\varphi$  на коэффициент несинусоидальности  $\xi$ .

В установках печей сопротивления используются тиристорные регуляторы напряжения с фазоимпульсной (ФИМ) и низкочастотной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

При ФИМ и ШИМ значение коэффициента мощности одинаково и равно корню квадратному отношения потребляемой мощности к номиналу

$$X = \sqrt{P / P_{\text{ном}}},$$

однако спектральный состав искажений при ФИМ и ШИМ различен: при ФИМ в спектре тока присутствуют высшие гармонические составляющие, при ШИМ – субгармонические составляющие (частоты, не кратные сетевой). Считается, что негативное влияние субгармоник на электрооборудование питающей сети выражено менее, чем для высших гармоник, поэтому с точки зрения влияния на сеть ШИМ предпочтительнее.

Нужно иметь в виду, что использование ШИМ невозможно в случаях, когда требуется плавное регулирование действующего значения напряжения (при ШИМ регулируется среднее значение мощности, вводимой в печь):

- печи с нагревателями из тугоплавких металлов, дисилицида молибдена, карбида кремния в связи с необходимостью разогрева нагревателя при пониженном напряжении или компенсации старения (карбид кремния);

- когда понижение напряжения для питания нагревателей, рассчитанных на напряжение ниже сетевого, осуществляется не использованием трансформатора, а ограничением угла открывания тиристорных.

Кроме того, применение ШИМ не рекомендуется, если материал нагревателей плохо переносит термоциклирование (периодическое изменение температуры, пусть даже с небольшой амплитудой), поскольку при широтно-импульсной модуляции в установившемся режиме в печи возникают колебания температуры с постоянной амплитудой вокруг задания. К таким материалам относится хромит лантана.

Фактически, ШИМ не применяется в любых высокотемпературных печах, неважно, вакуумных или с воздушной средой, за исключением печей с нагревателями из углеродных материалов, включая углеродные композиты.

Следует отметить, что ШИМ не обеспечивает плавное изменение вводимой в печь мощности, регулирование осуществляется с некоторой дискретностью, поэтому при ШИМ погрешность регулирования температуры менее 0,5–1% недостижима. Поэтому в установках с особыми требованиями к точности регулирования температуры (установки для выращивания монокристаллов, термообработки крупных оптических стекол и др.) применяются регуляторы с ФИМ.

При всех преимуществах с точки зрения спектрального состава тока использование широтно-импульсного регулирования, тем не менее, может привести к колебаниям напряжения в питающей сети и резонансным явлениям, а также к ослаблению креплений токоподводов из-за периодических ударных динамических воздействий при включении нагрузки.

Для выравнивания кривой потребляемого тока и уменьшения бестоковых пауз возможно использование многоканального синхронизированного широтно-импульсного регулирования [12].

## 2.13. Типовые задачи расчета и проектирования ЭПС

### *Пример теплового расчета ЭПС периодического действия*

Необходимо спроектировать электрическую печь сопротивления для нагрева под термическую обработку цилиндрических валов из нержавеющей стали диаметром 400 мм, длиной 2000 мм. Технологический процесс термообработки состоит из нагрева от начальной температуры  $t_{\text{нг.н}} = 20^\circ\text{C}$  до конечной  $t_{\text{нг.к}} = 950^\circ\text{C}$  за 6,5 часов и медленного остывания изделий в печи до  $t_{\text{ост.к}} = 650^\circ\text{C}$  со скоростью не выше  $10^\circ\text{C}/\text{час}$ . Теплопроводность материала загрузки) вала  $\lambda_3 = 41,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , удельная теплоемкость  $c_3 = 630 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ . Среда в печи – воздушная.

Производительность установки – три вала в сутки. Масса загрузки (вала)  $G_3 = 1960 \text{ кг}$ . Вал загружается в печь вместе со специальной подвеской из жароупорной стали массой 200 кг.

Протяженный вал удобно нагревать в вертикальном положении, наиболее подходящим типом печи является шахтная печь (с цилиндрической шахтой), рассчитанная на одновременный нагрев одного вала.

Полезное тепло (тепло, расходуемое на нагрев вала) определяется как

$$Q_{\text{пол}} = c_3 G_3 (t_{\text{нг.н}} - t_{\text{нг.к}}),$$

$$Q_{\text{пол}} = 630 \cdot 1960 \cdot (950 - 20) = 114,8 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Аналогично определяется вспомогательное тепло (расходуемое на нагрев подвески)

$$Q_{\text{всп}} = 500 \cdot 200 \cdot (950 - 20) = 9,3 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Для определения тепловых потерь печи сконструируем ее футеровку (рис. 2.32). Внутренний диаметр печи принимаем 800 мм, исходя из необходимости размещения нагревателей на стенках. Диаметр горловины печи принимаем 600 мм, высоту рабочего пространства 2500 мм. Стены шахты состоят из внутреннего (огнеупорного) слоя кирпича марки ШЛ-1,0 (шамот-легковес плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$ ) толщиной 230 мм (кладка в один кирпич) и наружного (теплоизоляционного) слоя диатомитового кирпича марки Д-650 (плотностью  $650 \text{ кг/м}^3$ ) толщиной также 230 мм. Днище печи состоит из слоев тех же материалов и той же толщины. Крышка печи выполняется из слоя шамотных плит общей толщиной 200 мм и слоя шлаковой ваты (плотностью  $300 \text{ кг/м}^3$ ) толщиной 300 мм.

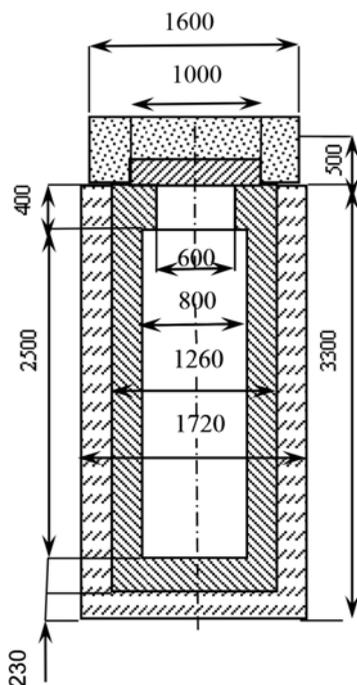


Рис. 2.32. Эскиз шахтной печи (к примеру расчета)

Считая температуру печи равной  $1000^\circ\text{C}$  (на  $50^\circ\text{C}$  выше конечной температуры нагрева изделия), принимаем начальное приближение температуры на границе легковес – диатомит в стенках печи  $650^\circ\text{C}$ , а в днище печи  $500^\circ\text{C}$ . Начальное приближение температуры кожуха печи берем  $50^\circ\text{C}$ .

Проведем расчет тепловых потерь для стен печи.  
Теплопроводность материалов (шамота-легковеса и диатомита)

$$\lambda_{\text{шл}} = 0,29 + 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot (1000 + 650)/2 = 0,505 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С});$$

$$\lambda_{\text{диат}} = 0,145 + 0,314 \cdot 10^{-3} \cdot (650 + 50)/2 = 0,236 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}).$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией для наружной поверхности футеровки  $\alpha_{\text{нар}} = 11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  (табличное значение).

Площади:  
внутренней поверхности футеровки

$$F_1 = 3,14 \cdot 0,8 \cdot 2,9 = 7,28 \text{ м}^2;$$

поверхности раздела огнеупорного и теплоизоляционного слоев

$$F_2 = 3,14 \cdot 1,26 \cdot 2,9 = 11,47 \text{ м}^2;$$

кожуха печи (наружной поверхности футеровки)

$$F_3 = 3,14 \cdot 1,72 \cdot 2,9 = 15,65 \text{ м}^2.$$

Расчетная площадь огнеупорного слоя

$$F_I = \frac{7,28 + 11,47}{2} = 9,375 \text{ м}^2,$$

теплоизоляционного слоя

$$F_{II} = \frac{11,47 + 15,65}{2} = 13,56 \text{ м}^2.$$

Расчетные площади слоев определяются как средние арифметические, поскольку  $F_2/F_1$  и  $F_3/F_2 < 2$ .

Мощность тепловых потерь через стены печи определяется аналогично Задаче 1.3, §1.3

$$P_{\text{п.т.стен}} = \frac{t_1 - t_{\text{нар}}}{\frac{S_{\text{шл}}}{\lambda_{\text{шл}} F_I} + \frac{S_{\text{диат}}}{\lambda_{\text{диат}} F_{II}} + \frac{1}{\alpha F_3}},$$

$$P_{\text{п.т.стен}} = \frac{1000 - 20}{\frac{0,23}{0,505 \cdot 9,875} + \frac{0,23}{0,236 \cdot 13,56} + \frac{1}{11,6 \cdot 15,65}} = 7778 \text{ Вт}.$$

Проверяем температуры:

температура на границе огнеупора и теплоизоляции

$$t_{\text{гр}} = t_{\text{п}} - P_{\text{п.т.стен}} \cdot \frac{S_{\text{шл}}}{\lambda_{\text{шл}} \cdot F_I},$$

$$t_{\text{гр}} = 1000 - 7778 \cdot \frac{0,23}{0,505 \cdot 9,875} = 619 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{кож}} = t_{\text{нар}} - P_{\text{п.т.стен}} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} \cdot F_3},$$

температура кожуха печи

$$t_{\text{кож}} = 20 + 7778 \cdot \frac{1}{11,6 \cdot 15,65} = 59 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Совпадение с начальным приближением температур приемлемое, поэтому выполнять вторую итерацию расчета нет необходимости. Отметим, что температура на границе шамота и диатомита не превышает допустимую для диатомита ( $900^\circ\text{C}$ ), а температура на кожухе печи не превышает допустимую по санитарным нормам ( $60^\circ\text{C}$ ).

Мощность тепловых потерь через днище и крышку печи рассчитывается аналогично потерям через стены печи.

Для днища печи:

$$\lambda_{\text{шл}} = 0,29 + 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot (1000 + 500)/2 = 0,485 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$\lambda_{\text{диат}} = 0,145 + 0,314 \cdot 10^{-3} \cdot (500 + 50)/2 = 0,231 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$\alpha_{\text{нар}} = 11,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)};$$

$$F_1 = 3,14 \cdot (0,8^2/4) = 0,502 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 3,14 \cdot (1,26^2/4) = 1,25 \text{ м}^2;$$

$$F_I = \sqrt{0,502 \cdot 1,25} = 0,792 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = 3,14 \cdot (1,72^2/4) = 2,32 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{п}} = \sqrt{1,25 \cdot 2,32} = 1,70 \text{ м}^2.$$

(расчетные площади слоев определяются как средние геометрические, поскольку  $F_2/F_1$  и  $F_3/F_2 > 2$ ).

Мощность потерь тепла через днище

$$P_{\text{п.т.днища}} = \frac{1000 - 20}{\frac{0,23}{0,485 \cdot 0,792} + \frac{0,23}{0,231 \cdot 1,70} + \frac{1}{11,6 \cdot 2,32}} = 797 \text{ Вт}.$$

Проверяем температуры:

$$t_{\text{гр}} = 1000 - 797 \cdot \frac{0,23}{0,485 \cdot 0,792} = 522 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{кож}} = 20 + 797 \cdot \frac{1}{11,6 \cdot 2,32} = 52 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Совпадение приемлемое.

Задаемся приближением температуры в крышке на границе огнеупора (шамотной плиты) и теплоизоляции (шлаковой ваты)  $800^\circ\text{C}$ , приближением температуры на коже  $40^\circ\text{C}$ .

$$\lambda_{\text{шам}} = 0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot (1000 + 800)/2 = 1,36 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\lambda_{\text{ваты}} = 0,06 + 0,157 \cdot 10^{-3} \cdot (800 + 40)/2 = 0,126 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{\text{нар}} = 10,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

$$F_1 = 3,14 \cdot (0,6^2/4) = 0,283 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 3,14 \cdot (1,0^2/4) + 3,14 \cdot 1,0 \cdot 0,2 = 1,413 \text{ м}^2;$$

$$F_I = \sqrt{0,283 \cdot 1,413} = 0,63 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = 3,14 \cdot (1,6^2/4) + 3,14 \cdot 1,6 \cdot 0,5 = 4,52 \text{ м}^2;$$

$$F_{II} = \sqrt{1,413 \cdot 4,52} = 2,53 \text{ м}^2.$$

Мощность потерь тепла через крышку

$$P_{\text{п.т.крышки}} = \frac{1000 - 20}{\frac{0,2}{1,36 \cdot 0,63} + \frac{0,3}{0,126 \cdot 2,53} + \frac{1}{10,6 \cdot 4,52}} = 814 \text{ Вт}.$$

Проверяем температуры:

$$t_{\text{гр}} = 1000 - 814 \cdot \frac{0,2}{1,36 \cdot 0,63} = 810 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{кож}} = 20 + 814 \cdot \frac{1}{10,6 \cdot 4,52} = 37 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Совпадение хорошее.

Температура на границе шамота и шлаковой ваты не превышает допустимую для шлаковой ваты, а температура на коже печи не превышает допустимую по санитарным нормам.

Коэффициент неучтенных потерь принимаем равным 1,2. Суммарная мощность тепловых потерь печи при ее температуре  $1000^\circ\text{C}$  равна

$$P_{\text{п.т. } 1000} = 1,2 \cdot (7778 + 797 + 823) = 11 \text{ 300 Вт}.$$

Для расчета времени остывания изделия в печи определяем аккумулярованное конструкцией печи вместе с загрузкой и подвеской тепло.

Масса шамота-легковеса стен печи, принимая плотность шамота-легковеса 1000 кг/м<sup>3</sup>

$$G_{\text{ШЛ стен}} = 1000 \cdot 2,9 \cdot 0,23 \cdot 1,03 \cdot 3,14 = 1870 \text{ кг.}$$

Аккумулированное им тепло

$$Q_{\text{ак. ШЛ стен}} = 1068 \cdot 1870 \cdot 810 = 162 \cdot 10^7 \text{ Дж,}$$

где 1068 Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость шамота-легковеса, 810°С – средняя температура слоя шамота-легковеса, взятая из расчета тепловых потерь.

Масса шамота-легковеса днища

$$G_{\text{ШЛ днища}} = 1000 \cdot 0,792 \cdot 0,23 = 182 \text{ кг.}$$

Аккумулированное им тепло

$$Q_{\text{ак. ШЛ днища}} = 1054 \cdot 182 \cdot 761 = 14,6 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Аналогично масса шамота крышки

$$G_{\text{шам. крышки}} = 1850 \cdot 0,63 \cdot 0,2 = 233 \text{ кг.}$$

Аккумулированное им тепло

$$Q_{\text{ак. шам. крышки}} = 1087 \cdot 233 \cdot 904 = 22,9 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Масса диатомита стен печи

$$G_{\text{диат. стен}} = 650 \cdot 3,2 \cdot 0,23 \cdot 1,49 \cdot 3,14 = 2440 \text{ кг.}$$

Аккумулированное им тепло

$$Q_{\text{ак. диат. стен}} = 879 \cdot 2440 \cdot 339 = 72,7 \cdot 10^7 \text{ Дж,}$$

Масса диатомита днища

$$G_{\text{диат. днища}} = 650 \cdot 1,70 \cdot 0,23 = 254 \text{ кг.}$$

Аккумулированное им тепло

$$Q_{\text{ак. диат. днища}} = 879 \cdot 254 \cdot 287 = 6,41 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Масса шлаковой ваты крышки

$$G_{\text{ваты крышки}} = 300 \cdot 2,52 \cdot 0,3 = 227 \text{ кг.}$$

Аккумулированное ею тепло

$$Q_{\text{ак. ваты крышки}} = 1047 \cdot 227 \cdot 424 = 10,1 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Суммарное аккумулированное футеровкой тепло при температуре печи 1000°С

$$Q_{\text{ак. фут.}} = (162 + 14,6 + 22,9 + 72,7 + 6,41 + 10,1) \cdot 10^7 = 289 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Тепло, аккумулированное изделием  $Q_{\text{ак. изд.}}$ , равно полезному теплу  $Q_{\text{пол}}$  и составляет  $114,8 \cdot 10^7$  Дж.

Количество тепла, аккумулированное жароупорной подвеской, равно вспомогательному теплу  $Q_{\text{всп}}$  и составляет  $9,3 \cdot 10^7$  Дж.

Полное количество тепла, аккумулированное загруженной печью при температуре печи  $1000^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{ак. 1000}} = (289 + 114,8 + 9,3) \cdot 10^7 = 413 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Приближенно можно считать аккумулированное тепло, а также мощность тепловых потерь печи пропорциональными ее температуре. При  $650^\circ\text{C}$  (конец остывания изделия в печи) будем иметь

$$Q_{\text{ак. 650}} = 413 \cdot 10^7 \cdot 650/1000 = 268 \cdot 10^7 \text{ Дж};$$

$$P_{\text{п.т. 650}} = 11\,300 \cdot 650/1000 = 7350 \text{ Вт.}$$

Количество тепла, которое теряет печь за время остывания

$$Q_{\text{ак. 1000-650}} = (413 - 268) \cdot 10^7 = 145 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Средняя мощность тепловых потерь за время остывания изделия в печи (определяется как среднее арифметическое потерь в начале и в конце остывания)

$$P_{\text{п.т. ср. ост.}} = (11\,300 + 7350)/2 = 9325 \text{ Вт.}$$

Время остывания

$$\tau_{\text{ост}} = 145 \cdot 10^7 / (9325 \cdot 3600) = 43,2 \text{ часа.}$$

Средняя скорость остывания изделия

$$V_{\text{ост}} = (950 - 650)/43,2 = 6,9^\circ\text{C/час.}$$

Таким образом, скорость остывания получилась меньше допустимой ( $10^\circ\text{C/час}$ ). Для уменьшения времени остывания (и всего цикла печи) и, соответственно, увеличения производительности печи можно было бы пойти на облегчение футеровки и некоторое увеличение потерь тепла.

Полное время цикла (принимая время простоя печи 1 час)

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{нг}} + \tau_{\text{ост}} + \tau_{\text{пр}} = 6,5 + 43,2 + 1 \approx 51 \text{ час.}$$

Следовательно, для получения заданной производительности в три вала в сутки необходимо установить шесть идентичных печей.

Средняя мощность потерь тепла за время нагрева (печь прогревается от  $650$  до  $1000^\circ\text{C}$ ) равна средней мощности потерь за время остывания и составляет  $9325$  Вт. Тепловые потери за время нагрева составляют

$$Q_{\text{п.т. нг}} = 9325 \cdot 6,5 \cdot 3600 = 21,8 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Тепловые потери за время остывания равны разности количества теплоты, аккумулированного футеровкой, при 1000°C и при 650°C

$$Q_{\text{п.т. ост}} = 289 \cdot 10^7 \cdot (1000 - 650) / 1000 = 101 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Тепловые потери за время простоя печи

$$\begin{aligned} Q_{\text{п.т.пр}} &= 7350 \cdot 1,0 \cdot 3600 + \\ &+ 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,62 \left[ \left( \frac{650 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 3,14 \cdot \frac{0,6^2}{4} \cdot 0,2 \cdot 3600 = \\ &= (2,65 + 0,42) \cdot 10^7 = 3,07 \cdot 10^7 \text{ Дж,} \end{aligned}$$

где  $2,65 \cdot 10^7$  Дж – потери печи через футеровку и тепловые короткие замыкания при температуре 650°C;  $0,42 \cdot 10^7$  Дж – потери (излучением) через открытую крышку при длительности открытого состояния крышки 0,2 часа и коэффициенте диафрагмирования 0,62.

Полный расход тепла за цикл

$$Q_{\text{цикл}} = (114,8 + 9,3 + 21,8 + 101 + 3,07) \cdot 10^7 = 250 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Коэффициент полезного действия печи

$$\eta = 114,8 \cdot 10^7 / (250 \cdot 10^7) = 0,459,$$

удельный расход электроэнергии

$$W_{\text{уд}} = 250 \cdot 10^7 / (3,6 \cdot 10^3 \cdot 1960) = 354 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$$

Установленная мощность с учетом коэффициента запаса 1,2

$$P_{\text{уст}} = 1,2 \cdot 250 \cdot 10^7 / (6,5 \cdot 3,6 \cdot 10^6) = 128 \text{ кВт.}$$

Установленная мощность округляется до значения 130 кВт (кратного 5 кВт).

Можно видеть, что КПД печи низок. Это обусловлено большими потерями аккумулированного конструкцией печи тепла при остывании изделий в печи. Установленная мощность велика, поскольку во время нагрева приходится компенсировать тепло, потерянное в период остывания. Большая установленная мощность приводит к удорожанию электрооборудования и значительному увеличению массового расхода сплава для нагревателей.

Поэтому целесообразно проводить процесс остывания изделий не в печи, а в отдельной футерованной камере или колодце. Это возможно, если технологический процесс не требует остывания в защитной среде.

Если отказаться от остывания изделий в печи, то потери тепла за время простоя в нашем примере составят  $5,6 \cdot 10^7$  Дж (пересчитаны с температуры  $650^\circ\text{C}$  на  $1000^\circ\text{C}$ ), потери тепла за время нагрева –  $26,4 \cdot 10^7$  Дж (аналогичный пересчет). Расход тепла за цикл составит

$$Q_{\text{цикл}} = (114,8 + 9,3 + 26,4 + 5,6) \cdot 10^7 = 156 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

Установленная мощность

$$P_{\text{уст}} = 1,2 \cdot 156 \cdot 10^7 / (6,5 \cdot 3,6 \cdot 10^6) = 80 \text{ кВт.}$$

Значение коэффициента полезного действия составляет

$$\eta = 114,8 \cdot 10^7 / (156 \cdot 10^7) = 0,736,$$

т.е. почти на 30% больше чем в предыдущем случае. Удельный расход электроэнергии составляет

$$W_{\text{уд}} = 156 \cdot 10^7 / (3,6 \cdot 10^3 \cdot 1960) = 221 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$$

Время цикла в случае остывания в отдельной камере составляет 7,5 ч, поэтому требуемую производительность (три вала в сутки) можно получить в одной печи.

Разобранный пример наглядно показывает, насколько энергетически невыгодно проводить остывание изделий в печи.

### ***Пример расчета нагревательных элементов ЭПС***

Выполним расчет нагревателей печи сопротивления шахтного типа из предыдущего примера. Конечная температура нагрева загрузки  $950^\circ\text{C}$ , температура печи принята  $1000^\circ\text{C}$ , мощность 80 кВт. Питание – трехфазное, напряжение 380/220 В.

Нагреватели размещаются на боковых стенках печи. Поскольку высота рабочего пространства печи 2,5 м (рис. 2.31), выделяем по высоте две равные тепловые зоны мощностью по 40 кВт каждая.

Задаемся температурой нагревателя в работе  $1030^\circ\text{C}$  (на  $30^\circ\text{C}$  выше температуры печи). В качестве материала нагревателя выбираем безникелевый сплав Х23Ю5Т. В этом температурном диапазоне также способны работать сплавы Х20Н80-Н, ХН70Ю, ХН60Ю3 и ряд других никельсодержащих сплавов, но все они дороже, чем Х23Ю5Т. По сравнению со сплавом Х27Ю5Т сплав Х23Ю5Т более технологичен (обладает большей пластичностью).

По графику рис. 2.21 определяем удельную поверхностную мощность идеального нагревателя  $W_{\text{ид}} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ .

Рассмотрим два варианта конструктивного исполнения нагревателя – ленточный зигзагообразный нагреватель, подвешиваемый на крючках, и проволочная спираль, размещаемая на керамической полочке. Проведем расчет для каждого варианта.

Для случая ленточного зигзага примем относительный шаг  $e/b = 2$ , исходя из рекомендаций §2.9, направленных на снижение массового расхода сплава. Коэффициент шага  $\alpha_r$  по графику рис. 2.22 равен 1,6, коэффициент эффективности  $\alpha_{эф}$  для ленточного зигзага равен 0,40. Коэффициент  $\alpha_p$  для печи периодического действия принимается равным 1. Считаем, что в печи осуществляется двухпозиционное регулирование температуры, поэтому определяем значение  $\alpha_c$ . Площадь тепловоспринимающей поверхности изделия (боковой поверхности цилиндра)  $F_{изд} = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 2 = 2,512 \text{ м}^2$ , площадь стенки, на которой размещены нагреватели,  $F_{ст} = 3,14 \cdot 0,8 \cdot 2,5 = 6,28 \text{ м}^2$ . Степень черноты загрузки принимаем равной 0,8, степень черноты стенки – 0,9. Тогда согласно ф. (2.34)

$$C_{пр} = \frac{5,67}{\frac{1}{0,8} + \frac{2,512}{6,28} \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right)} = 4,38 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

По рисунку 2.23а  $\alpha_c = 1,2$ .

Удельная поверхностная мощность реального нагревателя по (2.33)

$$W = 2,5 \cdot 10^4 \cdot 0,40 \cdot 1,6 \cdot 1 \cdot 1,2 = 1,92 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Используем ленту с отношением ширины к толщине  $m = b/a = 10$ . Считая, что подключение нагревателей трехфазное, на фазное напряжение 220 В, и подставляя в расчетное выражение (2.40) мощность одной фазы (треть установленной мощности зоны), получим толщину ленты

$$a = \sqrt[3]{\frac{1,51 \cdot 10^{-6} \cdot 13,3^2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10 \cdot 11 \cdot 220^2 \cdot 1,92 \cdot 10^4}} = 0,001 \text{ м}.$$

Выбираем ближайшую толщину из стандартного ряда  $a = 1,5 \text{ мм}$ . С учетом  $m = 10$  сечение ленты нагревателя  $1,5 \times 15 \text{ мм}$ .

Развернутая длина нагревателя одной фазы согласно формуле (2.41)

$$L = \frac{220^2 \cdot 10 \cdot 0,0015^2}{1,51 \cdot 10^{-6} \cdot 13,3 \cdot 10^3} = 54,2 \text{ м}.$$

Размещаем нагреватели в шесть рядов по высоте стенки печи, по одному ряду на фазу. Окружность шахты печи составляет  $3,14 \cdot 800 = 2500 \text{ мм}$ , расстояние между выводами нагревателя 100 мм, поэтому зигзаг должен разместиться на  $2500 - 100 = 2400 \text{ мм}$  протяженности стенки.

При относительном шаге  $e/b = 2,0$  шаг нагревателя  $e$  (расстояние между двумя соседними вертикальными отрезками ленты) равен  $2 \cdot 15 = 30 \text{ мм}$ . Количество полувогн зигзага  $2400/30 = 80$ . Развернутая длина полувогны  $54,2/80 = 0,678 \text{ м}$ .

Длину полуволны можно представить как  $B + 3,14e/2$ , где  $B$  – длина вертикального отрезка ленты. Высота зигзага  $H = B + e$ .

В нашем случае  $B = 0,678 - 3,14 \cdot 0,03/2 = 0,631$  м;  $H = 0,631 + 0,03 = 0,661$  м. Такая высота не только больше допустимой для ленточного зигзага величины 400 мм, но и вовсе не позволит разместить 6 рядов нагревателей на стенке высотой 2,5 м.

Чтобы вписать нагреватель в рабочее пространство печи, уменьшим относительный шаг нагревателя до минимально допустимого значения 0,9. Безникелевые сплавы недостаточно пластичны и слишком хрупки для того, чтобы обеспечить столь малый шаг, поэтому переходим к изготовлению нагревателей из нихрома Х20Н80-Н. Нихром – дорогой материал, однако нагреватель из безникелевого сплава Х23Ю5Т можно в нашем случае разместить в рабочем пространстве печи, только подключив его на пониженное напряжение (чтобы уменьшить развернутую длину) с использованием понижающего трансформатора, что обойдется еще дороже.

Новое значение коэффициента  $\alpha_r$  (зависит от относительного шага) равно 1,0. Удельная поверхностная мощность реального нагревателя  $W = 1,13 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Толщина ленты

$$a = \sqrt[3]{\frac{1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 13,3^2 \cdot 10^6}{2 \cdot 10 \cdot 11 \cdot 220^2 \cdot 1,13 \cdot 10^4}} = 0,0011 \text{ м.}$$

Выбираем ближайшую толщину из стандартного ряда  $a=1,5$  мм. С учетом  $m=10$  сечение ленты нагревателя  $1,5 \times 15$  мм (не изменилось по сравнению с предыдущим значением).

Развернутая длина нагревателя одной фазы

$$L = \frac{220^2 \cdot 10 \cdot 0,0015^2}{1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 13,3 \cdot 10^3} = 71,2 \text{ м.}$$

Шаг нагревателя  $0,9 \cdot 15 = 13,5$  мм, количество полуволн  $2400/13,5 = 178$ . Развернутая длина полуволны  $71,2/178 = 0,4$  м.  $B = 0,4 - 3,14 \cdot 0,0135/2 = 0,379$  м; высота зигзага  $H = 0,379 + 0,0135 = 0,3925$  м. Такая высота вписывается в рекомендуемые для ленточного зигзага пределы (до 400 мм) и, кроме того, позволяет разместить 6 рядов нагревателей на стенке высотой 2,5 м. Поскольку никельсодержащие сплавы не подвержены крипу, запас на крип не требуется, т.е. ряды нагревателей могут размещаться по высоте практически вплотную друг к другу.

Масса нагревателя одной фазы по (2.41)

$$G = 8400 \cdot 10 \cdot 0,0015^2 \cdot 71,2 = 13,5 \text{ кг.}$$

Масса нагревателей всей печи

$$G_{\text{печи}} = 6 \cdot 13,5 = 81 \text{ кг.}$$

Теперь рассчитаем вариант нагревателя в виде проволочной спирали, также из нихрома Х20Н80-Н.

Примем относительный шаг  $t/d = 3,2$ .

Коэффициенты для расчета удельной поверхностной мощности:  $\alpha_{\text{эф}} = 0,32$ ;  $\alpha_r = 1,45$ ;  $\alpha_p = 1$ ;  $\alpha_c = 1,2$ . Удельная поверхностная мощность реального нагревателя

$$W = 2,5 \cdot 10^4 \cdot 0,32 \cdot 1,45 \cdot 1 \cdot 1,2 = 1,39 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Диаметр проволоки согласно формуле (2.39)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 13,3^2 \cdot 10^6}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot 1,39 \cdot 10^4}} = 0,00497 \text{ м.}$$

Ближайшее большее значение из стандартного ряда составляет 5,0 мм.

Развернутая длина нагревателя одной фазы

$$L = \frac{220^2 \cdot 3,14 \cdot 0,005^2}{4 \cdot 1,15 \cdot 10^{-6} \cdot 13,3 \cdot 10^3} = 62,1 \text{ м.}$$

Нагреватели размещаем на керамических полочках, по четыре ряда полочек по высоте на фазу – всего 24 ряда спиралей на печь. Полочки устанавливаются с шагом 100 мм.

При относительном шаге  $t/d = 3,2$  шаг нагревателя  $t = 16$  мм. Количество витков спирали  $4 \cdot 2400/16 = 600$ . Развернутая длина витка  $62,1/600 = 0,104$  м.

Диаметр спирали  $D = 0,104/3,14 = 0,033$  м. Отношение диаметра спирали к диаметру проволоки  $D/d = 6,6$ , что вписывается в рекомендуемые пределы (не более 10 для нихромов). Кроме того, такой диаметр спирали укладывается в расстояние между полочками, таким образом, нагреватели успешно разместились в рабочем пространстве печи.

Масса нагревателя одной фазы

$$G = 8400 \cdot 3,14 \cdot (0,005^2/4) \cdot 62,1 = 10,2 \text{ кг.}$$

Масса нагревателей всей печи

$$G_{\text{печи}} = 6 \cdot 10,2 = 61,2 \text{ кг.}$$

Как видно, массовый расход сплава сопротивления в случае проволочного спирального нагревателя оказался ниже, чем для ленточного зигзагообразного нагревателя. В принципе, чаще бывает наоборот, но нужно помнить, что для размещения ленточного нагревателя в печи мы были вынуждены уменьшить шаг до минимума, уйдя, таким образом из области оптимальных по расходу сплава значений относительного шага. Однако более важным показателем является отно-

шение массового расхода к сроку службы нагревателя. В первом приближении срок службы прямо пропорционален диаметру проволоки, при такой оценке ленточный нагреватель заменяется эквивалентным проволочным диаметром 1,75а. В нашем случае соотношение сроков службы проволочного и ленточного нагревателя будет  $5/(1,75 \cdot 1,5) = 1,9$ , т.е. проволочный нагреватель прослужит в 1,9 раз дольше. При этом масса проволочного нагревателя меньше, чем ленточного, поэтому по соотношению массы сплава к сроку службы проволочный нагреватель оказался существенно более предпочтительным.

*Читателю предлагается выполнить самостоятельно расчет спирального нагревателя из безникелевого сплава Х23Ю5Т. Возможно, его удастся разместить в рабочем пространстве без использования пониженного напряжения питания.*

### Контрольные вопросы

1. Каковы основные технологические и технико-экономические преимущества и недостатки нагрева сопротивления по сравнению с другими видами электронагрева?

2. Каковы основные области применения нагрева сопротивления?

3. Какие классификационные группы электропечей сопротивления (ЭПС) выделяют в зависимости от рабочей температуры?

4. В чем заключается различие между ЭПС периодического и непрерывного действия?

5. Почему рабочая температура ЭПСНД конвейерного типа, как правило, ограничена значением 900–1000°С?

6. Что понимают под «тепловой зоной» в ЭПС? С какой целью в ЭПС выделяют тепловые зоны? Каковы рекомендуемые размеры тепловой зоны?

7. Почему рабочая температура карусельных печей и печей с шагающим подом может быть выше, чем у ЭПС непрерывного действия других типов?

8. С какой целью организуется замкнутая циркуляция (рециркуляция) воздуха в печах с принудительной циркуляцией атмосферы? Применима ли 100-процентная рециркуляция в сушильных печах?

9. Какими основными преимуществами и недостатками обладают жидкостные ванны?

10. Какая субстанция выступает в качестве теплоносителя в печах с псевдокипящим слоем? Какими преимуществами обладают такие печи по сравнению с жидкостными ваннами?

11. Почему атмосферу экзогаза нельзя использовать при термообработке высокоуглеродистых сталей?

12. Какие меры по герметизации рабочего пространства принимаются в печах с контролируемой атмосферой?

13. В чем заключается опасность использования атмосферы эндогаза? Какие меры безопасности необходимо использовать при использовании в печах взрывоопасных и (или) токсичных газовых атмосфер?

14. По каким причинам в высокотемпературных вакуумных и (или) высоковакуумных печах вместо керамической футеровки используется металлическая экранная теплоизоляция? Из каких материалов изготавливают экраны в зависимости от температуры?

15. Какой род тока – постоянный или переменный – используется при прямом (электроконтактном) нагреве? Из каких соображений?

16. В чем заключается цель составления энергетического (теплого) баланса при расчете ЭПС? Какие составляющие учитываются в энергетическом балансе?

17. Каким образом определяется установленная мощность ЭПС периодического действия? Почему при расчете потребной мощности потребная энергия делится на время нагрева, а не на время цикла?

18. В чем заключаются особенности теплового расчета ЭПС непрерывного действия?

19. Насколько выше температуры печи принимается температура нагревателя среднетемпературной печи в работе?

20. Что понимается под «идеальным нагревателем»? Как определяется удельная поверхностная мощность идеального нагревателя? Какие факторы учитываются при ее пересчете в удельную поверхностную мощность реального нагревателя?

21. Что необходимо предпринять, если расчетную развернутую длину нагревателя не удастся разместить в рабочем пространстве печи?

22. Какие существуют резервы для повышения производительности ЭПС?

23. Почему охлаждение изделий в камере печи энергетически невыгодно? Какие технические решения обеспечивают рекуперацию тепла (использование тепла, накопленного конструкцией печи в предыдущем цикле нагрева, при нагреве следующей загрузки) в случаях, когда контакт горячей загрузки с кислородом воздуха недопустим?

24. Каким образом можно уменьшить количество теплоты, расходуемое на нагрев тары, загружаемой в печь вместе с изделием?

25. В чем заключается преимущество использования футеровочных материалов низкой плотности, особенно в печах периодического действия?

26. Какие меры принимаются для выравнивания суммарной кривой энергопотребления при групповой работе ЭПС периодического действия?

27. Чему равен естественный  $\cos \varphi$  ЭПС косвенного нагрева? Какое влияние оказывает работа регулятора температуры ЭПС на питающую сеть при фазоимпульсном и широтно-импульсном регулировании мощности? В каких случаях не рекомендуется использование широтно-импульсного регулирования?

28. Какие принципы положены в основу работы тиристорных регуляторов напряжения?

29. Какие признаки используют для классификации тиристорных регуляторов напряжения?

30. Что понимают под релейным режимом работы тиристорного регулятора напряжения?

31. Какие способы управления тиристорами используют в тиристорных преобразователях?

32. Какое влияние оказывает способ управления тиристорами на характеристики тиристорных преобразователей?

33. Сравните схемы тиристорных преобразователей по таким показателям как простота, регулировочные свойства и возможности генерирования высокочастотных помех.

34. Какое влияние оказывает широтно-импульсное управление тиристорами на работу электрической печи сопротивления?

35. Какую роль выполняют микропроцессорные регуляторы температуры в системах управления ЭПС?

36. Почему микропроцессорные регуляторы температуры заменили в промышленных установках ЭПС аналоговые регуляторы?

37. По каким признакам различают микропроцессорные регуляторы?

38. Какое влияние оказывает архитектура микропроцессорного регулятора на выполняемые им функции?

39. Какие типы микропроцессорных регуляторов температуры используются в ЭПС?

40. Какие способы ввода входных сигналов используются в микропроцессорных регуляторах температуры?

41. Какие способы вывода выходных сигналов используются в микропроцессорных регуляторах температуры?

42. Какие задачи решают микропроцессорные регуляторы в системах управления ЭПС?

43. Какое влияние оказывает организация выходов микропроцессорных регуляторов на выбор силовых исполнительных элементов и характеристики системы управления?

44. Какими тиристорными преобразователями могут управлять микропроцессорные регуляторы с релейным выходом?

45. Какими тиристорными преобразователями могут управлять микропроцессорные регуляторы, имеющие аналоговый выход?

## Список рекомендуемой литературы

1. История электротехники / под ред. И.А. Глебова. – М.: Издательство МЭИ, 1999.
2. Simpson, G.V. Electrical heating apparatus / патент US 25,532 A / Оpubл. 20 сентября 1859 г.
3. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи. Часть 1. Электрические печи сопротивления. – 2-е изд. / А.Д. Свенчанский. – М.: Энергия, 1975.
4. Электротермическое оборудование: справочник / под ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980.
5. Автоматическое управление электротермическими установками / под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Рубцов, В.П. Исполнительные элементы систем автоматического управления электротехнологическими установками: учеб. пособие / В.П. Рубцов. – М.: Издательство МЭИ, 2001.
7. Рубцов, В.П. Системы автоматического управления электрическими печами сопротивления: учебное пособие. Ч. 1. / В.П. Рубцов, А.В.Щербаков. – М.: Издательство МЭИ, 2015.
8. URL:<http://owen.ru/product210> Дата обращения 08.12.2022 г.
9. Погребиский, М.Я. Расчет электрических печей сопротивления: учеб. пособие / М.Я. Погребиский, Н.Г. Батов. – М.: Издательство МЭИ, 2012.
10. Чердниченко, В.С. Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления / В.С. Чердниченко, А.С. Бородачев, В.Д. Артемьев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006.
11. Чердниченко, В.С. Электрические печи сопротивления. Конструкции и эксплуатация электропечей сопротивления / В.С. Чердниченко, А.С. Бородачев, В.Д. Артемьев. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006.
12. Погребиский, М.Я. Разработка способов и систем регулирования температуры электропечей сопротивления с улучшенными энергетическими показателями: автореф. ... к.т.н. / М.Я. Погребиский. – М.: МЭИ, 2001.

## УСТАНОВКИ ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

### 3.1. История развития индукционного и диэлектрического нагрева

Появление и развитие метода индукционного нагрева явилось следствием успехов, достигнутых в теории электромагнетизма и практической электротехники в XIX в. Индукционный нагрев проводников основан на физическом явлении электромагнитной индукции, открытом М. Фарадеем в 1831 г. и ставшим отправной точкой теории индукционного нагрева. Чуть ранее в 1826 г. Георг Ом установил закон, определяющий связь электрического напряжения с силой тока, протекающего в проводнике, и сопротивлением проводника. Д. Джоуль в 1841 г. и Э. Ленц в 1842 г. установили, что прохождение тока по проводнику сопровождается выделением тепла. Д.К. Максвелл в 1850 – 1870-е гг. получил основополагающие уравнения электромагнитного поля, носящие его имя, и построил систему современной электродинамики. Теорию индукционного нагрева начали разрабатывать О. Хэвисайд (Англия, 1884 г.), С. Ферранти, С. Томпсон, Ивинг. Их работы явились основой для создания техники индукционного нагрева. Так как при индукционном нагреве теплота выделяется в проводящем теле – слое, равном глубине проникновения электромагнитного поля, то появляются возможности точного управления температурой для обеспечения качественного нагрева при высокой производительности. Другим преимуществом является бесконтактность нагрева [1].

Впервые эффект нагрева диэлектрика в переменном электромагнитном поле зафиксировали в 1864 г. Э.В. Сименс (Германия) и в 1886 г. И.И. Боргман (Россия) – исследовался нагрев стеклянной стенки конденсатора (лейденской банки) при заряде и разряде [1]. Диэлектрический нагрев первоначально нашел применение в медицине.

Таким образом, в течение XIX в. были сделаны открытия, составляющие основу современной электротехники, и были заложены теоретические основы техники индукционного и диэлектрического нагрева. Тем не менее развитие индукционного нагрева относится в основном к XX в. Относительно позднее развитие индукционного нагрева при наличии основных научных предпосылок объясняется отсутствием источников тока достаточной мощности, а также сравнительно низким уровнем развития промышленности того времени, не нуждавшейся в высокопроизводительных методах нагрева и не предъявлявшей столь высоких требований к материалам, технологии и автоматизации процессов, как в наше время.

Только в конце XIX – начале XX вв. появились первые индукционные печи, где использовались наведенные токи и соответствующие источники теплоты для плавки металлов.

Первыми установками индукционного нагрева были индукционные плавильные печи с магнитопроводами. Опытная печь с открытым горизонтальным каналом была построена в Англии в 1887 г. Ферранти, а первая промышленная печь того же типа – в Швеции в 1900 г. Кьеллином. Эти печи, применявшиеся для переплавки стали, обладали плохими энергетическими характеристиками, в частности относительно большой индуктивностью рассеяния, что заставляло применять пониженную частоту, получаемую от специального генератора [1 – 2].

В 1905 г. Рёхелинг-Роденхаузер (Германия) сконструировал многофазные канальные печи (с двумя и тремя индукторами), в которых каналы соединены с ванной, питание от сети 50 Гц. В последующих конструкциях печей использовались также закрытые каналы для плавки цветных металлов. С 1916 г. стали разрабатываться промышленные индукционные канальные печи (ИКП) с закрытым каналом.

В связи с рядом преимуществ печей с закрытым каналом развитие печей с открытым каналом приостановилось.

Появление первых индукционных тигельных печей (ИТП) приходится на первое десятилетие XX в. Так как ИТП малой емкости могут эффективно работать только на частотах выше 50 Гц, то их создание сдерживалось из-за отсутствия соответствующих источников питания – преобразователей частоты. Тем не менее в 1905 – 1906 гг. ряд фирм и изобретателей предложили и запатентовали ИТП, к ним относятся фирма «Шнейдер – Крезю» (Франция), О. Цандер (Швеция), Герден (Англия) [1]. В 1908 г. в журнале «Электричество» А.Н. Лодыгин (Россия) опубликовал статью, в которой были описаны принцип работы и конструкция тигельной индукционной печи без магнитопровода [3].

Первую промышленную ИТП с искровым высокочастотным генератором разработал в 1916 г. Э.Ф. Нортруп (США). С 1920 г. эти печи стала выпускать фирма «Аякс электротермик». В.П. Вологдин (СССР) в 1930 – 1932 гг. создал промышленные ИТП емкостью 10 и 200 кг с питанием от машинного преобразователя частоты. В 1937 г. он же построил ИТП с питанием от лампового генератора [1]. С 60-х годов стали использоваться тиристорные инверторы для питания индукционных установок. С увеличением емкости ИТП стало возможным эффективное применение питания током промышленной частоты.

В целом до середины 30-х гг. XX в. индукционный нагрев находил только два технологических применения: плавка металлов и нагрев деталей радиоламп во время откачки в электровакуумной промышленности.

Индукционные плавильные печи послужили прообразом многочисленных установок индукционного нагрева с целью осуществления различных технологических операций. В 1935 г. профессор В.П. Вологдин предложил метод индукци-

онной поверхностной закалки. После Второй мировой войны индукционный нагрев получил широкое распространение в кузнечном производстве для сквозного нагрева деталей перед пластической обработкой, для сварки, пайки, отжига, отпуска, для получения материалов сверхвысокой чистоты и для других целей. Компактные, практически без тепловой инерции и всегда готовые к работе индукционные нагреватели идеально вписываются в непрерывные автоматизированные линии.

Начиная с 50-х годов стали развиваться специальные виды индукционной плавки металлов: вакуумная в керамическом тигле, вакуумная в гарнисаже, вакуумная в холодном тигле, в электромагнитном тигле, во взвешенном состоянии, с использованием плазменно-индукционного нагрева (80-е годы) и др.

Вакуумные индукционные печи до 1940 г. применялись только в лабораторных условиях. В 50-х гг. стали разрабатываться промышленные вакуумные индукционные печи, единичная емкость которых стала быстро возрастать.

Стремление снизить загрязнение металла и тепловые потери в холодном тигле привели к использованию электромагнитных сил для отжатия металла от стенок, т.е. к созданию «электромагнитного тигля» (Л.Л. Тир, ВНИИЭТО, 1962 г.).

Метод высокочастотной индукционной зонной плавки полупроводников был предложен в 1952 г. (В.Г. Пфанн, США). Работы по высокочастотной бестигельной зонной плавке в нашей стране начались в 1956 г., и во ВНИИТВЧ был получен монокристалл кремния диаметром 18 мм.

В начале 60-х годов Ф.К. Монфорт (США) провел высокочастотную плавку оксидов в индукционной печи (выращивание монокристаллов ферритов при использовании токов высокой частоты – радиочастот). В СССР технология высокочастотной плавки оксидов разработана в Физическом институте АН СССР (А.М. Прохоров, В.В. Осико).

Явление высокочастотного разряда в газе известно с 80-х годов XIX в. В 1926–1927 гг. Дж.Дж. Томсон (Англия) показал, что безэлектродный разряд в газе создается индуцированными токами, а Дж. Таунсенд (Англия, 1928 г.) объяснил разряд в газе действием электрического поля. Все эти исследования проводились при пониженных давлениях.

В 50-е годы в разных странах проводились работы по высокочастотной плазме. В СССР они велись с конца 50-х годов в Ленинградском политехническом институте, МЭИ, ВНИИТВЧ и др. Исследовались разряды в различных газах, конструкции плазмотронов и технологии с их использованием.

Большой вклад в развитие низкотемпературного индукционного нагрева (индукционный нагрев ферромагнитной стали) на промышленной частоте внесли Н.М. Родигин, В.В. Александров, А.В. Донской (30-е – 60-е гг.).

Параллельно с развитием индукционного нагрева металлов велись разработки в области высокочастотного нагрева диэлектриков. В 1930 – 1934 гг. началась разработка технологии сушки древесины токами высокой частоты

(Н.С. Селюгин, ЦНИИ механической обработки древесины). В это же время А.И. Иоффе получил авторское свидетельство на высокочастотную сушку (ВЧ-сушку) древесины. Опыт советских исследователей был широко использован за рубежом. В иностранной литературе указывается на приоритет СССР. Позднее диэлектрический нагрев стал применяться и в других странах (Франция, США, Германия). В дальнейшем диэлектрический нагрев получил широкое промышленное применение для нагрева пластмасс и других материалов с целью прессования, сварки, склеивания и т.д.

Параллельно с развитием техники индукционного и диэлектрического нагрева активно развивается теория индукционного и диэлектрического нагрева. На 40 – 60-е гг. XX в. приходится появление большого количества книг по теории и практике индукционного нагрева металлов.

Применение ЭВМ при моделировании индукционных электротермических установок (70 – 80-е гг.) позволило существенно продвинуть вперед теорию индукционного нагрева, началось развитие численных методов.

Большой вклад в развитие и преподавание теории и практики индукционного нагрева внесли сотрудники кафедры «Электротермические установки» МЭИ, затем «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» (в настоящее время кафедра «Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий» НИУ «МЭИ»), в частности фундаментальная работа доцента А.М. Вайнберга [4]. Его последователи занимались в МЭИ разработками в области индукционного нагрева ферромагнитной стали [5], которые были использованы в установках для подогрева деталей под наплавку, термообработки стали и железобетона, обогрева химических реакторов, пресс-форм и др. (70 – 80-е годы). Эти работы проводились совместно с ведущими отраслевыми предприятиями.

В 90-е – 2000-е годы в МЭИ продолжились работы в области индукционного нагрева ферромагнитной стали, индукционных плавильных печей, автоматизации установок индукционного нагрева и плавки, совершенствовались численные методы расчета установок индукционного нагрева. В 2000-е годы в МЭИ совместно с фирмой «ССТ» (Специальные системы и технологии) была разработана и внедрена система индукционно-резистивного нагрева (ИРСН или скин-система) для обогрева промышленных трубопроводов.

Развитие индукционного и диэлектрического нагрева идет по пути совершенствования его технологии и автоматизации, в том числе и на основе современной микропроцессорной техники. В связи с расширением использования установок индукционного и диэлектрического нагрева в промышленности и быту, необходимостью повышения их производительности и энергоэффективности особое значение приобрело совершенствование источников питания и систем управления, направленное на улучшение энергетических показателей и надежности установок для нагрева проводящих материалов и диэлектриков.

В настоящее время проектирование современных установок индукционного нагрева и плавки осуществляется с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) – CAD, CAM, CAE-систем. Происходит развитие в области источников питания для установок индукционного нагрева. В технику индукционного нагрева внедряются современные микропроцессорные системы управления. Прогресс в этих направлениях определяется, в том числе, и уровнем развития теории индукционного нагрева, в частности, уровнем развития моделирования устройств индукционного нагрева и технологических процессов с использованием индукционного нагрева.

### 3.2. Физические основы индукционного и диэлектрического нагрева

Математическое описание электромагнитного поля в проводящих и непроводящих средах, в общем виде, дают дифференциальные уравнения Дж. К. Максвелла (60-е годы XIX в.), приведенные в векторной форме:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \tau}; \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \tau}; \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \sigma; \quad (3.4)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}; \quad (3.5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}. \quad (3.6)$$

Обозначения величин в уравнениях (3.1–3.6):

*параметры поля:*  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{B}$  – напряженность и индукция магнитного поля, А/м и Т;  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{D}$  – напряженность и индукция (смещение) электрического поля, В/м и Кл/м<sup>2</sup>;  $f$  – частота, Гц;  $\mathbf{J}$  – плотность тока проводимости, А/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – объемная плотность электрических зарядов, К/м<sup>3</sup>;

*параметры материала (среды):*  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

*магнитная и электрическая постоянные:*  $\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-6} = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м и  $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-9} / (36 \pi) = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м; время  $\tau$ , с.

Принято, что характеризующие электромагнитное поле величины изменяются во времени синусоидально и представляются комплексными зависимостями вида  $H = H_m e^{j\omega\tau}$ .

В правой части уравнения (3.1) суммируются плотность тока проводимости  $\mathbf{J}$ , определяемая согласно закону Ома в дифференциальной форме по формуле  $\mathbf{J} = \mathbf{E}/\rho$ , и плотность тока смещения  $\partial\mathbf{D}/\partial t$ . При расчете параметров электромагнитного поля обычно задаются свойствами среды, при этом выделяют проводящие материалы, для которых характерны низкие значения удельного электрического сопротивления ( $\rho < 1 \cdot 10^{-2}$  Ом·м), и диэлектрические материалы с высоким значением удельного электрического сопротивления ( $\rho > 1 \cdot 10^8$  Ом·м). Для проводников учитывают только ток проводимости (током смещения пренебрегают), а для диэлектриков – только ток смещения.

Уравнения Максвелла являются феноменологическими, т.е. они созданы без рассмотрения физических процессов взаимодействия электромагнитного поля и вещества, состоящего из электрически заряженных частиц.

Физические механизмы нагрева материалов в электромагнитном поле для проводников и диэлектриков существенно различаются.

Ток проводимости определяется поступательным движением электрически заряженных частиц вещества, при этом для металлических проводников характерна электронная проводимость, а для электролитов и плазмы – ионная.

Ток смещения объясняется колебательным движением (смещением) электрических частиц вещества, приводящем к разделению зарядов (поляризации) в диэлектрике.

Оба физических механизма связаны с преобразованием электромагнитной энергии в тепловую, т.е. часть энергии упорядоченного движения электрически заряженных частиц вследствие случайных соударений приводит к неупорядоченному (тепловому). Соответственно различают индукционный и диэлектрический виды нагрева.

Электромагнитная энергия преобразуется в тепловую в соответствии с законом Джоуля–Ленца, который приведен в дифференциальной форме для мощности на единицу объема, Вт/м<sup>3</sup>:

$$p_{0V} = \rho J^2. \quad (3.7)$$

Решение уравнений Максвелла позволяет получать математическое описание процессов индукционного нагрева и рассчитать электрические и энергетические характеристики устройств индукционного нагрева.

**Индукционный нагрев** связан с непостоянством параметров электромагнитного поля в нагреваемом проводящем теле, которое характеризуется глубиной проникновения электромагнитной волны в полубесконечное проводящее тело, м:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}. \quad (3.8)$$

Глубина проникновения  $\Delta$  – это расчетный параметр, который входит в формулы для распределения напряженности магнитного поля  $H$ , а также плотности тока  $J$  и выделяющейся в единице объема мощности по сечению проводящего тела. Наибольшие значения эти величины имеют на поверхности тела.

Физический смысл параметр  $\Delta$  имеет только для распространения плоской электромагнитной волны в плоском полубесконечном теле с постоянными электрофизическими свойствами  $\rho$  и  $\mu$ . В этом случае в слое толщиной  $\Delta$  амплитуды  $H$  и  $J$  снижаются в  $e \approx 2,72$  раз по сравнению с их значениями на поверхности полубесконечного тела.

В связи с непостоянством параметров электромагнитного поля в проводящем теле выделяющуюся в нем энергию (или мощность, т.е. энергию в единицу времени) удобно характеризовать удельной поверхностной мощностью – мощностью, отнесенной к единице энергоспринимающей поверхности.

Удельная поверхностная мощность ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) определяется по формуле

$$p_{0s} = 1 \cdot 10^{-3} H_0^2 \sqrt{\rho \mu f} . \quad (3.9)$$

Здесь  $H_0$  – значение напряженности магнитного поля на поверхности тела.

Отметим, что глубина проникновения и выделяющаяся мощность при индукционном нагреве зависят как от параметров электромагнитного поля ( $H_0$  и  $f$ ), так и от электрофизических свойств нагреваемого проводящего тела ( $\rho$  и  $\mu$ ).

**Диэлектрический нагрев** также можно характеризовать глубиной проникновения и удельной мощностью, однако имеются существенные отличия их от аналогичных величин, описывающих процесс индукционного нагрева.

Глубина проникновения электромагнитной волны в полубесконечное тело из диэлектрического материала ( $m$ ) рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{9,55 \cdot 10^7}{f \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \delta} . \quad (3.10)$$

Для многих практических случаев диэлектрического нагрева на высоких частотах значение  $\Delta$  значительно превышает размеры нагреваемого диэлектрика, а, следовательно, напряженность электрического поля  $E$  в диэлектрике можно с достаточной точностью считать постоянной. Поэтому мощность, выделяющаяся в диэлектрике, будет также одинаковой во всех точках объема.

Удельная объемная мощность,  $\text{Вт}/\text{см}^3$ :

$$p_{0v} = 5,55 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2 . \quad (3.11)$$

При диэлектрическом нагреве, как и при индукционном нагреве, глубина проникновения и выделяющаяся удельная объемная мощность зависят от параметров электромагнитного поля ( $E$  и  $f$ ) и от электрофизических свойств нагреваемого диэлектрика ( $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ ).

Следует отметить, что электрофизические свойства материалов (как проводников, так и диэлектриков), в общем случае, зависят от параметров электромагнитного поля.

Математическое описание процессов индукционного и диэлектрического нагрева, например, на основе решения уравнений Максвелла, получают для наиболее часто встречающихся на практике задач, которые характеризуются следующими данными: значение частоты  $f$ , значения  $H$  или  $p_{os}$  (для индукционного нагрева) и  $E$  или  $p_{ov}$  (для диэлектрического нагрева), конфигурация электромагнитного поля, форма загрузки (полубесконечное тело, плита, цилиндр и др.).

### 3.3. Классификация и области применения индукционного и диэлектрического нагрева

Индукционный и диэлектрический нагрев находит самое широкое применение в промышленности. Ежегодно расширяются области использования, разрабатываются новые технологии с применением индукционного и диэлектрического нагрева, укрупняются единичные мощности агрегатов, расширяется диапазон используемых частот переменного тока.

Применяемые частоты и соответствующие области применения индукционного и диэлектрического нагрева приведены в табл. 3.1 [6].

Таблица 3.1

#### Частоты и области применения индукционного нагрева

Диапазон частот	Частоты ( $f$ )	Основные области применения
Пониженные	$0,5 \text{ Гц} < f < 50 \text{ Гц}$	Транспортирование и перемешивание расплавов, сквозной нагрев металлов
Промышленная	50 Гц (или 60 Гц)	Сквозной нагрев металлов, поверхностная закалка стали, плавка металлов
Средние	$50 \text{ Гц} < f < 66 \text{ кГц}$	Сквозной нагрев металлов, поверхностная закалка стали, плавка металлов, сварка и пайка металлов
Высокие	$66 \text{ кГц} < f < 300 \text{ МГц}$	Поверхностная закалка, сварка и пайка, нагрев полупроводников, плавка окислов, нагрев плазмы
Сверхвысокие	$0,3 \text{ ГГц} < f < 22,125 \text{ ГГц}$	Нагрев плазмы

Помимо чисто индукционного нагрева ( $H$ -нагрев), использующего магнитную составляющую электромагнитного поля напряженностью  $H$ , и диэлектрического нагрева ( $E$ -нагрев), использующего электрическую составляющую электромагнитного поля напряженностью  $E$ , достаточно широко применяются комбинированные виды электронагрева: индукционно-плазменный и индукционно-резистивный ( $HR$ -нагрев), а также косвенный индукционный нагрев с промежуточным нагревателем.

Индукционные установки разделяются на индукционные плавильные и нагревательные установки (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Классификация устройств индукционного нагрева

*Индукционной плавильной установкой* называют индукционную установку, в которой нагреваемый металл или сплав доводится до плавления, т.е. меняет свое агрегатное состояние в процессе нагрева.

Индукционные плавильные установки предназначены для плавки черных и цветных металлов, получения высококачественных сталей и специальных сплавов, требующих особой чистоты и точности химического состава, плавки благородных металлов.

Индукционные плавильные установки подразделяются на индукционные канальные печи, индукционные тигельные печи, индукционные вакуумные печи, индукционные печи с холодным тиглем, индукционные печи непрерывного действия, устройства для плавки в электромагнитном тигле, устройства для зонной плавки, устройства для выращивания монокристаллов, устройства для гарнисажной плавки, устройства для струйной плавки.

В *индукционной нагревательной установке* конечная температура нагрева всегда ниже температуры плавления материала.

Индукционные нагревательные установки предназначены для сквозного нагрева под пластическую деформацию, сквозного нагрева под термообработку, поверхностной закалки, сварки, пайки, наплавки.

Значения применяемых удельных поверхностных и объемных мощностей  $p_{os}$  и  $p_{ov}$  при нагреве изделий и соответствующих напряженностей магнитного и электрического поля  $H$  и  $E$  определяются конкретными технологическими процессами (значениями температуры нагрева, электрофизическими свойствами материалов и т.д.) и возможностями оборудования (мощностью источника питания, допустимым током индуктора, допустимым напряжением на рабочем конденсаторе и т.п.) и приводятся в табл. 3.2 и 3.3.

Укажем, что напряженность электромагнитного поля на рабочем месте обслуживающего персонала регламентируется правилами безопасной эксплуатации установок индукционного нагрева. В частности, предельно допустимые по ГОСТ 12.1.006-84 «Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля» значения  $E$  и  $H$  для электромагнитных полей различных частот приведены ниже:

Частоты	$H$ , А/м	$E$ , В/м
60 кГц – 3 МГц	5	50
3 МГц – 30 МГц	–	20
30 МГц – 50 МГц	0,3	10
50 МГц – 300 МГц	–	5

Таблица 3.2

**Параметры электромагнитных полей  
при индукционном нагреве**

Технологический процесс	Удельная поверхностная мощность $p_{os}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Напряженность магнитного поля $H_0$ , А/м	Частоты
Плавка металлов	$1 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$	Средние; 50 Гц
Сквозной нагрев металлов	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	Средние; 50 Гц
Нагрев ферромагнитной стали	5 – 100	$1 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$	50 Гц
Поверхностная закалка	$2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$	Средние и высокие
Сварка и пайка	$\leq 1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$	Высокие
Плавка полупроводников	$\leq 1 \cdot 10^3$	$\leq 5 \cdot 10^3$	Высокие
Плавка оксидов	$(0,5 - 2) \cdot 10^3$	$\leq 5 \cdot 10^3$	Высокие
Нагрев плазмы	$\leq 1 \cdot 10^3$	$\leq 1 \cdot 10^4$	Высокие; СВЧ

Таблица 3.3

**Параметры электромагнитных полей  
при диэлектрическом нагреве**

Технологический процесс	Удельная объемная мощность $p_{ov}$ , Вт/см <sup>3</sup>	Напряженность электрического поля $E$ , кВ/см	Частоты
Сушка	0,3 – 2,0	0,1 – 1,0	Высокие
Сварка пластиков	< 1500	1,5 – 50,0	Высокие
Нагрев реактопластов	20	2,0 – 15,0	Высокие
Склеивание	12	1,0 – 2,5	Высокие

Для установок сверхвысоких частот лимитируются значения плотности потока энергии, т.е. удельной поверхностной мощности, и время облучения персонала в течение рабочего дня. Например, при облучении не более двух часов за рабочий день допустимая плотность потока СВЧ-энергии не должна превышать  $100 \text{ мкВт/см}^2$ .

Кроме того, эксплуатация ЭТУ для индукционного и диэлектрического нагрева связана с генерированием электромагнитных волн, создающих помехи для работы радиоэлектронного оборудования, в том числе радио- и телевидения. Поэтому уровень электромагнитного поля, создаваемого в окружающем пространстве при работе ЭТУ, регламентируется государственным стандартом. Также регламентируются и значения напряженности электрического поля высокой частоты в питающей электрической сети.

Таким образом, при создании ЭТУ для индукционного и диэлектрического нагрева решаются не только задачи эффективного нагрева изделий, но и разрабатываются безопасные конструкции и режимы работы установок.

### 3.4. Индукционная электротехнологическая установка

Электротермические установки, предназначенные для индукционного нагрева или плавки тех или иных материалов, называются *индукционными установками*.

Под индукционной установкой понимают весь комплекс устройств, обеспечивающих осуществление электротехнологического (электротермического) процесса, и включающий *устройство* индукционного нагрева, источник питания, устройства автоматики и управления, комплектующее оборудование, токоподводы, некоторые вспомогательные устройства и т.п. Индукционную установку можно также называть индукционным *электротехнологическим комплексом*. В состав индукционной электротехнологической установки (ЭТУ) входит электротехнологическое устройство – индукционная печь или индукционный нагреватель, в котором, собственно, и осуществляется *электротехнологический процесс*, т.е. индукционный нагрев или плавка.

Блок-схема индукционной ЭТУ представлена на рис. 3.2. Источник питания ИП индукционной установки (трансформатор или преобразователь частоты) подключен к электрической сети и обеспечивает требуемую мощность  $P$ , напряжение  $U$  и частоту тока  $f$ . Система управления обеспечивает стабилизацию и регулирование процесса нагрева, например, путем изменения  $U$  и  $f$ . Конденсаторная батарея КБ применяется в индукционных ЭТУ практически всегда для компенсации реактивной мощности системы индуктор-загрузка.

Отметим многообразие вариантов устройств индукционного нагрева и, следовательно, систем индуктор-загрузка, что соответствует разнообразным технологическим процессам и формам загрузки.

Основные *преимущества* индукционных ЭТУ: бесконтактность нагрева, высокие скорости нагрева, возможность точного управления температурой для обеспечения качественного нагрева, удобства управления и экологичность. *Недостатки*: высокая стоимость и сложность оборудования.

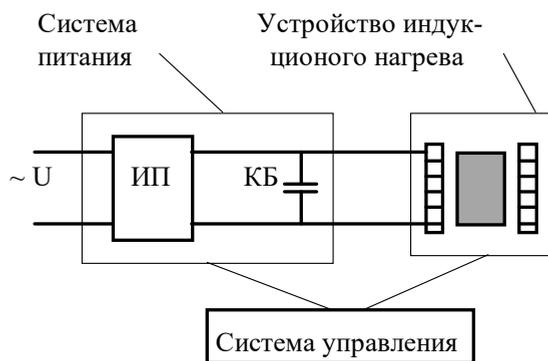


Рис. 3.2. Блок-схема индукционной ЭТУ

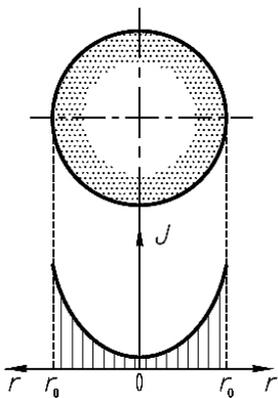
*Индукционной печью* называется часть индукционной установки, включающая индуктор, каркас, камеру для плавки, а также механизмы наклона печи, вакуумную систему и т.п. Наличие замкнутой камеры для плавки конструктивно отличает индукционную печь от *индукционного нагревателя*.

### 3.5. Физические явления при индукционном нагреве

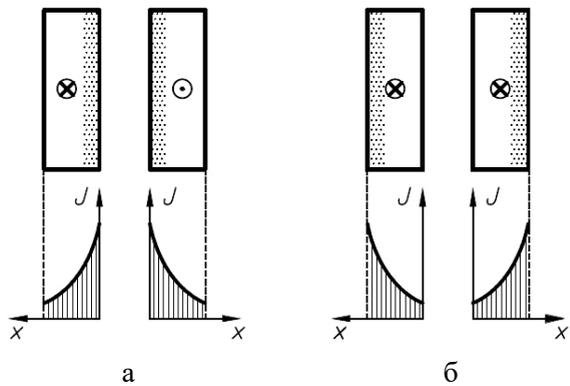
Физические явления при протекании переменного тока в проводниках связаны с его взаимодействием с магнитным полем (собственным или созданным другими токами) и заключаются в неравномерном распределении плотности тока в сечении проводников.

Поверхностный эффект при протекании переменного тока по проводнику выражается в увеличении плотности тока в поверхностных слоях проводника и иллюстрируется рисунком и графиком (рис. 3.3). При достаточно больших размерах сечения проводника, например, для проводника круглого сечения при  $r_0\sqrt{2}/\Delta \geq 10$ , плотность тока  $J$  снижается вглубь проводника по экспоненциальному закону.

Эффект близости – это эффект перераспределения плотности тока в сечениях двух близко расположенных проводников (рис. 3.4 а, б). При одинаковом направлении токов картина распределения плотности тока в проводниках напоминает распределение  $J$  при поверхностном эффекте.



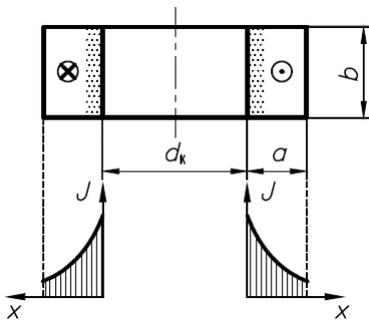
**Рис. 3.3. Поверхностный эффект в проводнике круглого сечения**



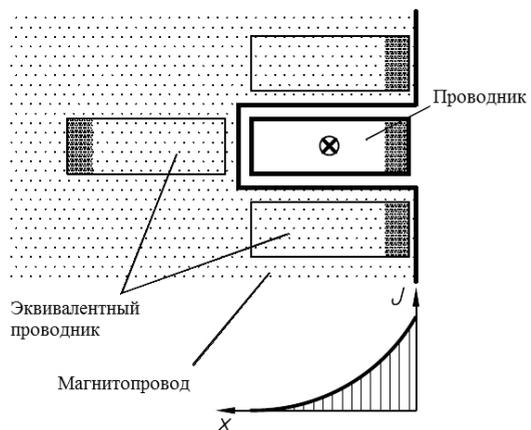
**Рис. 3.4. Эффект близости при противоположном (а) и одинаковом (б) направлениях токов в проводниках**

Кольцевой эффект (рис. 3.5) заключается в увеличении плотности тока на внутренней стороне сечения кольца. Кольцевой эффект аналогичен эффекту близости при разнонаправленных токах в проводниках и проявляется тем сильнее, чем меньше радиус кольца.

Эффект «магнитного паза» (рис. 3.6) проявляется в проводниках, которые с трех сторон окружены ферромагнитным материалом с большим удельным электрическим сопротивлением (принимается  $\rho \rightarrow \infty$  и  $\mu \rightarrow \infty$ ). Электрический ток вытесняется на открытую поверхность проводника. Ферромагнитный материал может быть заменен эквивалентными проводниками, т.е. эффект «магнитного паза» может рассматриваться как частный случай поверхностного эффекта.



**Рис. 3.5. Кольцевой эффект**



**Рис. 3.6. Эффект магнитного паза**

Распределение плотности тока  $J$  в сечении проводников зависит не только от свойств среды ( $\rho$  и  $\mu$ ), а также от частоты и силы тока ( $f$  и  $H$ ), т.е. от величин, характеризующих электромагнитное поле, но и от формы сечения проводника, его размеров и расстояния между проводниками.

Отметим, что показанные на рис. 3.3 – 3.6 графические зависимости  $J$  от координаты являются чисто качественными.

В каждом конкретном случае могут быть использованы те или иные методы расчета распределения плотности тока  $J$  (численные и аналитические).

Для многих практических целей можно использовать качественный метод оценки распределения плотности тока  $J$  в проводниках, основанный на соответствии картины распределения напряженности магнитного поля  $H$  в пространстве у поверхности проводников картине распределения  $J$  в проводниках. Максимуму  $H$  на поверхности соответствует максимум  $J$ .

Например, анализируя распределение плотности тока  $J$  при эффекте близости (рис. 3.4), можно сделать вывод, что для одинаково направленных токов электромагнитное поле между проводниками ослабляется, а при противоположно направленных токах поле в зазоре усиливается.

### 3.6. Основные характеристики индукционного нагрева

#### 3.6.1. Основные уравнения и методы расчета

Для расчета процесса индукционного нагрева и устройств индукционного нагрева используются два подхода.

Первый подход основан на решении задачи расчета параметров электромагнитного поля. Из системы дифференциальных уравнений (3.1) – (3.6) путем преобразований можно получить дифференциальное уравнение, описывающее изменение напряженности магнитного поля для проводящей среды в инвариантной форме:

$$\nabla^2 \dot{H} = k^2 \dot{H}, \quad (3.12)$$

где коэффициент равен

$$k^2 = j2\pi f \frac{\mu_0 \mu}{\rho} \quad (3.13)$$

Решение уравнения (3.12), записанного в системе прямоугольных, цилиндрических или сферических координат в зависимости от конфигурации электромагнитного поля, лежит в основе расчета параметров индукционного нагрева проводящих тел соответствующей формы.

Отметим, что для решения полевых задач может быть использован и векторный магнитный потенциал  $A$ , определяемый соотношением  $B = \text{rot } A$ , что в некоторых случаях упрощает вычисления.

Для получения математического описания процесса индукционного нагрева может быть использован и другой подход, основанный на известных физических законах.

Закон электромагнитной индукции (М. Фарадей, 1831) позволяет определить ЭДС, наведенную в проводящем теле:

$$e = -\frac{d\Phi}{d\tau}. \quad (3.14)$$

Закон Г. С. Ома (1826) в комплексной форме дает значение силы тока

$$i = \frac{e}{Z}. \quad (3.15)$$

Закон Дж. П. Джоуля – Э. Х. Ленца (1841–1842) позволяет рассчитать выделяющуюся тепловую мощность

$$P = i^2 R. \quad (3.16)$$

В уравнениях (3.14–3.16):  $e$  – электродвижущая сила,  $i$  – ток,  $P$  – активная мощность,  $R$ ,  $X$ ,  $Z$  – активное, реактивное и полное сопротивление,  $\Phi$  – магнитный поток.

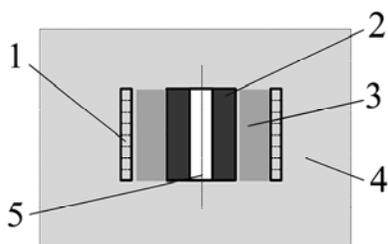
Использование в этих уравнениях интегральных параметров приводит к необходимости учета ряда физических эффектов, которые также влияют на процесс индукционного нагрева: неравномерность распределения плотности тока в сечении проводников, концевые эффекты (ослабление электромагнитного поля на концах системы индуктор–загрузка), непостоянство электрофизических свойств и др. Это достигается введением уточняющих эмпирических коэффициентов в формулы, позволяющие рассчитывать электрические и энергетические характеристики процесса и установок.

Для решения приведенных выше уравнений могут быть использованы различные аналитические и численные методы. Математическое описание процесса и установок индукционного нагрева может быть получено и методом физического моделирования.

### 3.6.2. Система индуктор-загрузка

При индукционном нагреве индуктор и нагреваемое проводящее тело (загрузка) образуют единую электромагнитную систему (систему И–З), в которой ток в индукторе и индуцированный ток в загрузке взаимодействуют.

Рассмотрим цилиндрическую осесимметричную систему И–3, рис. 3.7.

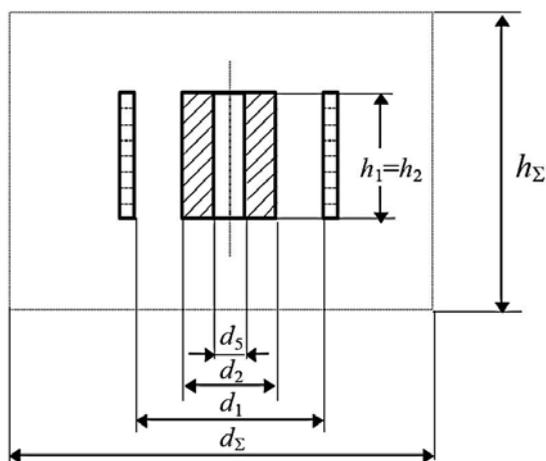


**Рис. 3.7. Система индуктор-загрузка:**

- 1 – индуктор; 2 – загрузка; 3 – зазор;
- 4 – пространство вне индуктора;
- 5 – пространство внутри загрузки

Основные участки системы И–3 указаны на рисунке. Общее электромагнитное поле системы И–3 теоретически бесконечно протяженно в пространстве. Однако для практических задач индукционного нагрева можно исключить из рассмотрения участки пространства, на которых напряженность магнитного поля  $H$  существенно уменьшилась, так как нагрев проводников пропорционален  $H^2$ . Принимаем, что система И–3 занимает конечный объем пространства в виде цилиндра диаметром  $d_\Sigma$  и высотой  $h_\Sigma$ . Будем в дальнейшем ко всем величинам, относящимся к индуктору, ставить индекс 1, к загрузке – 2 и к системе И–3– $\Sigma$ .

Основные геометрические размеры системы индуктор-загрузка показаны на рис. 3.8. Для простоты принято равенство высот индуктора и загрузки, т.е.  $h_1 = h_2$ , что в общем случае необязательно.



**Рис. 3.8. Основные размеры системы И–3**

Для расчета электрических и энергетических характеристик индукционной установки на каждом из участков системы И–3 (с номером  $i$ ) рассчитываются активная и реактивная энергии в единицу времени (активная и реактивная мощности  $P_i$  и  $Q_i$ ), которые затем в сумме дают значения активной, реактивной и полной мощностей системы И – 3:

$$P_{\Sigma} = \sum_i P_i = P_1 + P_2 + P_4, \quad (3.17)$$

$$Q_{\Sigma} = \sum_i Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (3.18)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}. \quad (3.19)$$

В уравнении (3.17) активная мощность  $P_4 \neq 0$  при использовании электромагнитного или ферромагнитного экрана.

Электрический КПД и коэффициент мощности системы И–3 определяются по формулам:

$$\eta = \frac{P_2}{P_{\Sigma}}, \quad (3.20)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}. \quad (3.21)$$

Такой энергетический подход к расчету систем И–3 был предложен доцентом МЭИ А.М. Вайнбергом [4] и в дальнейшем развит его учениками, а поэтому может быть назван методом МЭИ.

Для выполнения конкретных расчетов мощностей  $P_i$  и  $Q_i$  необходимо знать значения напряженности магнитного поля  $H_{0i}$  на границах участков, которые могут быть определены с использованием существующих методов по значениям силы тока индуктора  $I$  и числа витков  $w$  с учетом других параметров.

Используем формулу (3.9) для расчета активной мощности, выделяющейся на участке с номером  $i$  на поверхности площадью  $S_i$ :

$$P_i = 1 \cdot 10^{-3} H_{0i}^2 \sqrt{\rho_i l_i} f S_i \quad (3.22)$$

и примем для индуктора  $i = 1$  и для загрузки  $i = 2$ .

Для проведения анализа энергетических характеристик, представленных формулами (3.20) и (3.21), рассмотрим идеализированную систему И–3, в которой можно учитывать только три участка: *индуктор*, *загрузка* и *зазор*. При этом пренебрегаем кривизной поверхности индуктора и загрузки и принимаем одинаковым значения напряженности магнитного поля на поверхности индуктора и загрузки, т.е.  $H_{01} = H_{02} = H_0$ . Индуктор и загрузка имеют определяющие размеры, существенно превышающие значения глубин проникновения.

Тогда с учетом принятых допущений и принимая  $S_1 = S_2$ , идеальный электрический КПД системы индуктор–загрузка определяется по формуле:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\rho_1 \mu_1}}{\sqrt{\rho_2 \mu_2}}}. \quad (3.23)$$

Из (3.23) следует, что для достижения максимального электрического КПД необходимо уменьшить значение  $\sqrt{\rho_1 \mu_1}$  и/или увеличить значение  $\sqrt{\rho_2 \mu_2}$ . Таким образом, материал индуктора должен иметь минимальное электрическое удельное сопротивление  $\rho_1$  и быть немагнитным ( $\mu_1 = 1$ ), например, серебро, медь, алюминий, а материал загрузки должен иметь большие значения  $\rho_2$  и  $\mu_2$ , например, ферромагнитная конструкционная сталь.

Отметим роль температуры проводников. Для металлов нагрев сопровождается возрастанием  $\rho$ , поэтому на практике часто применяется принудительное охлаждение индуктора (воздушное или водяное), а для специальных задач может быть использовано криогенное охлаждение с применением конденсированных газов, например, жидких азота (температура 77 К) и водорода (температура 20 К).

Криоохлаждение индуктора, изготовленного из сверхчистого металла (медь, алюминий, бериллий), позволяет достичь значений  $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-9}$  (при 77 К) и даже  $\rho_1 = 2 \cdot 10^{-11}$  Ом·м (при 20 К). Криорезистивные проводники могут работать в сильных переменных электромагнитных полях, а затраты энергии на поддержание указанных значений криотемпературы в ряде случаев могут оказаться приемлемыми.

Применение сверхпроводимости связано сегодня с охлаждением жидким гелием при более низких температурах (ниже 15 К), что требует больших затрат электроэнергии и более сложных систем криостатирования. При этом возникают проблемы использования сильных токов и переменных электромагнитных полей, значительно усложняющих работу сверхпроводящих устройств индукционного нагрева. В перспективе экономически оправданным может стать применение открытых в 1988 г. так называемых высокотемпературных сверхпроводников, сохраняющих исчезающе малое электрическое удельное сопротивление (порядка  $1 \cdot 10^{-25}$  Ом·м) при температурах вплоть до 300 К и выше.

Коэффициент мощности системы И – 3 может быть записан из (3.17–3.19) и (3.21) в виде

$$\cos \varphi = \frac{P_1 + P_2 + P_4}{\sqrt{(P_1 + P_2 + P_4)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5)^2}}. \quad (3.24)$$

Так как возможности воздействия на параметры индуктора и загрузки обычно не велики, то для достижения наибольшего  $\cos\varphi$  необходимо уменьшать реактивные мощности в зазоре и вне индуктора  $Q_3$  и  $Q_4$ .

Для снижения  $Q_3$  следует уменьшать зазор между индуктором и загрузкой, что может оказаться нецелесообразным, так как приводит к уменьшению толщины футеровки и возрастанию тепловых потерь. В некоторых случаях значение зазора регламентируется технологией процесса.

Для снижения  $Q_4$  могут быть использованы ферромагнитные экраны (внешние магнитопроводы) или электромагнитные экраны (листовые медь или алюминий), которые в цилиндрической системе И–З устанавливаются снаружи индуктора на минимальном расстоянии от него (рис. 3.9).

Экраны уменьшают рассеивание электромагнитного поля, защищают от нагрева близкорасположенные элементы конструкции из стали, а также снижают уровень поля на рабочем месте, т.е. защищают персонал от биологического воздействия электромагнитного поля. Потери энергии в экранах в общем энергетическом балансе установки незначительны (активная мощность  $P_4$  в уравнении (3.17)).

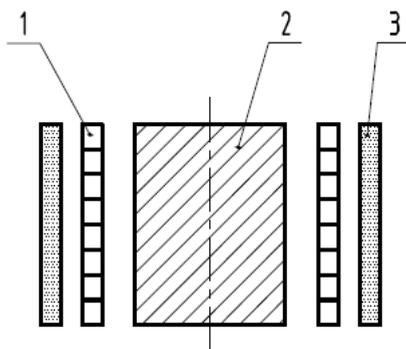
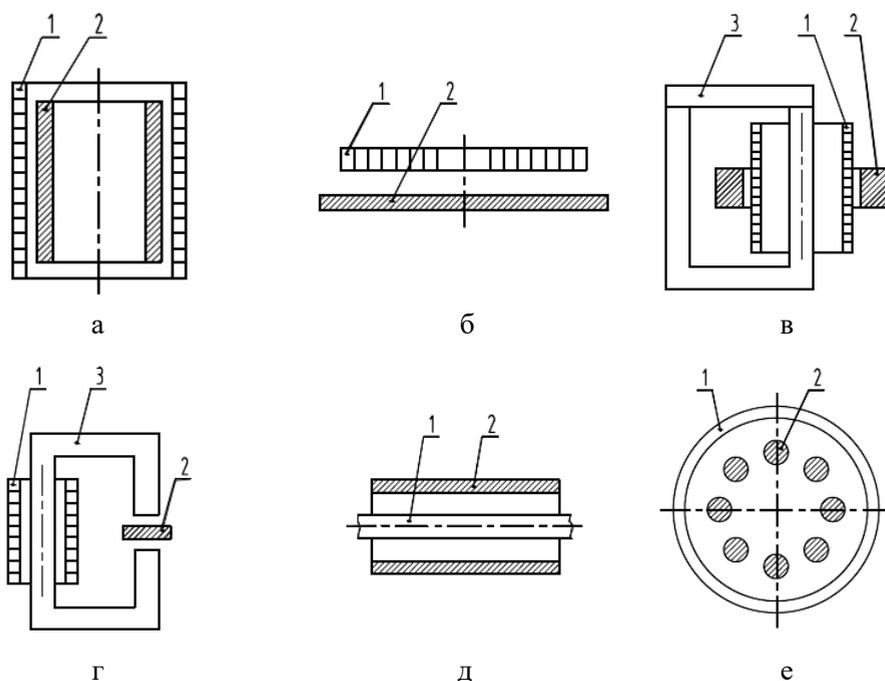


Рис. 3.9. Система индуктор (1) – загрузка (2) с использованием экрана (3)

Для «длинных» индукторов, у которых отношение длины индуктора к его диаметру более 5, значение  $Q_4$  относительно невелико и применение экранов нецелесообразно.

В практике индукционного нагрева помимо рассмотренной цилиндрической системы (рис. 3.10 а) применяются и другие варианты систем И–З, которые целесообразно классифицировать по основному признаку – конфигурации электромагнитного поля. На рисунке 3.10 б представлена плоская система И–З, широко применяемая для индукционного нагрева тел с плоской поверхностью. Для нагрева колец используется система И–З с индуктором, расположенным в полости кольца (рис. 3.10 в). Для нагрева плит и лент применяется устройство, реализующее нагрев загрузки в поперечном магнитном потоке (рис. 3.10 г). Устройство с индуктором, экранированным загрузкой, представлено на рис. 3.10 д.

В некоторых устройствах загрузка представляет собой совокупность стержней, размер сечения которых меньше глубины проникновения электромагнитной волны в материал загрузки (рис. 3.10 е). Тип системы И-З определяет специфику расчета ее электрических характеристик. Целесообразность применения экранов связана помимо типа системы И-З также и с ее геометрическими размерами, электрофизическими свойствами загрузки и частотой тока индуктора.



**Рис. 3.10. Типы систем индуктор-загрузка:**  
1 – индуктор; 2 – загрузка; 3 – магнитопровод

### 3.7. Расчет параметров электромагнитного поля

#### 3.7.1. Электромагнитная волна в полубесконечном проводящем теле

Для определения параметров плоской электромагнитной волны, которая характеризуется расположением векторов  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  и вектора Пойтинга  $\mathbf{S}$  по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  (система прямоугольных координат) в полубесконечном проводящем теле, т.е. бесконечно протяженном по оси  $z$  теле с плоской поверхностью (рис. 3.11), необходимо решить дифференциальное уравнение (3.12). Зависимость амплитуд  $H$  и  $E$  от координаты  $z$  показана на рисунке условно.

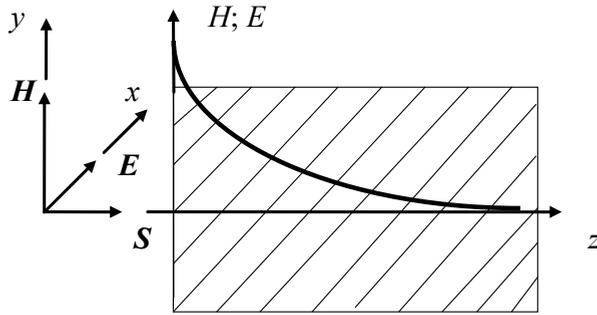


Рис. 3.11. Электромагнитная волна в полубесконечном проводящем теле

Таким образом, исходное дифференциальное уравнение при одномерной постановке задачи имеет вид

$$\frac{d^2 \dot{H}}{dz^2} = \dot{k}^2 \dot{H}. \quad (3.25)$$

Коэффициент  $\dot{k}^2 = \frac{j\omega\mu_0\mu}{\rho}$  характеризует свойства среды ( $j$  – мнимая единица).

Предположим, что электрофизические параметры  $\rho$  и  $\mu$  постоянны, т.е.  $\dot{k} = \text{const}$ . Это допущение позволяет использовать аналитический метод для решения уравнения (3.25).

Граничные условия для (3.25) формулируются следующим образом:  $z = 0$  – напряженность магнитного поля  $\dot{H} = \dot{H}_0$ ,  $z \rightarrow \infty$  –  $\dot{H} = 0$ .

Из выражения для  $\dot{k}^2$  с использованием тождества  $(1 + j)^2 = 2j$  находим формулу для  $\dot{k}$ :

$$\dot{k} = \frac{1 + j}{\Delta}. \quad (3.26)$$

Здесь  $\Delta$  – глубина проникновения электромагнитной волны в проводящую среду

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}}. \quad (3.27)$$

Отметим, что расчетная величина  $\Delta$  имеет физический смысл только для полубесконечного проводящего тела с постоянными значениями электрофизических свойств ( $\rho$  и  $\mu$ ). Во многих практических случаях значение  $\Delta$  используется в качестве параметра, который позволяет оценить степень неравномерности распределения плотности тока и внутренних источников теплоты в сечении нагреваемого проводящего тела конечных размеров.

Подставляя в (3.27) значения  $\omega$  и  $\mu_0$ , получаем приведенное выше выражение для глубины проникновения (3.8) в метрах:

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\omega f}}.$$

Решение дифференциального уравнения (3.25) имеет вид

$$\dot{H} = C_1 e^{-kz} + C_2 e^{kz}. \quad (3.28)$$

Здесь  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования.

После подстановки граничных условий получим формулу для напряженности магнитного поля в полубесконечном теле

$$\dot{H} = \dot{H}_0 e^{-kz} = \dot{H}_0 \exp\left(-\frac{1+j}{\Delta} z\right). \quad (3.29)$$

Для определения напряженности электрического поля  $\dot{E}$  используем полученное из уравнений Максвелла выражение

$$\dot{E} = -\rho \frac{d\dot{H}}{dz}. \quad (3.30)$$

Из (3.30) после подстановки  $\dot{H}$  и дифференцирования получаем

$$\dot{E} = \rho k \dot{H}_0 e^{-kz} = \dot{H}_0 (1+j) \frac{\rho}{\Delta} \exp\left(-\frac{1+j}{\Delta} z\right) \quad (3.31)$$

или, введя соответствующее обозначение,

$$\dot{E} = \dot{E}_0 e^{-kz} = \dot{E}_0 \exp\left(-\frac{1+j}{\Delta} z\right). \quad (3.32)$$

Из сравнения выражений для  $H$  и  $E$ , т.е. формул (3.29) и (3.32), следует, что затухание напряженностей магнитного и электрического поля идентично, но имеется сдвиг по фазе 45 электрических градусов. Необходимо помнить также, что векторы  $H$  и  $E$  в пространстве направлены по различным осям (рис. 3.11), т.е. в пространстве угол между векторами  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{E}$  составляет 90 геометрических градусов.

Перейдем к определению энергетических характеристик электромагнитного поля в полубесконечном проводящем теле.

Вектор потока энергии (вектор Умова-Пойнтинга) определяется по формуле:

$$\dot{S} = \frac{1}{2} \dot{E} \dot{H}^*. \quad (3.33)$$

Здесь  $\dot{H}^*$  – комплексно-сопряженная с  $\dot{H}$  величина.

С учетом полученных выше выражений (3.29) и (3.31) получим

$$\dot{S} = \frac{1}{2} \rho k \dot{H}_0^2 e^{-2kz}. \quad (3.34)$$

Выражение для потока энергии может быть представлено также в виде

$$\dot{S} = \dot{S}_0 e^{-2kz} = S_a + jS_q. \quad (3.35)$$

Здесь

$$\dot{S}_0 = \frac{1+j}{2} \frac{\rho}{\Delta} \dot{H}_0^2. \quad (3.36)$$

Для линейной среды активная и реактивная составляющие вектора потока энергии равны по модулю  $S_a = S_q$ . Значения  $S_a$  и  $S_q$  на поверхности равны выделяющимся в загрузке активной и реактивной мощностям  $P_{a\infty}$  и  $P_{q\infty}$ , отнесенным к  $1 \text{ м}^2$  поверхности полубесконечного тела.

По формулам (3.29), (3.32) и (3.35) на рис. 3.12 в относительных единицах построены графики зависимостей отношений амплитуд (или действующих значений)  $H/H_0$ ;  $E/E_0$ ;  $S/S_0$  от координаты  $z/\Delta$ . Зависимости для  $H/H_0$  и  $E/E_0$  совпадают. При  $z/\Delta = 1$  значения напряженностей магнитного и электрического поля снижаются в  $e \approx 2,72$  раз, а потока энергии в  $e^2 \approx 7,34$  раз по сравнению с их значениями на поверхности, т.е.  $H_\Delta/H_0 = E_\Delta/E_0 = 0,368$  и  $S_\Delta/S_0 = 0,136$ .

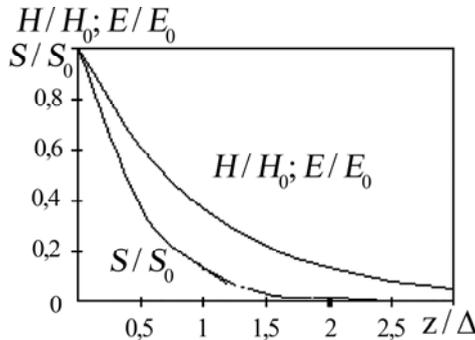


Рис. 3.12. Зависимости  $H/H_0$ ;  $E/E_0$ ;  $S/S_0$  от координаты  $z/\Delta$

При  $z/\Delta = 3$  значения  $H/H_0$  и  $E/E_0$  уменьшаются в  $e^3 \approx 19,3$  раз, а потока энергии  $S/S_0$  в  $e^6 \approx 384,1$  раз по сравнению с их значениями на поверхности, т.е. для многих практических задач расчета индукционных устройств становятся пренебрежимо малыми.

Уменьшение потока энергии в слое, равном глубине проникновения электромагнитной волны, означает, что электромагнитная энергия была поглощена средой, т.е. преобразовалась в тепловую энергию. В слое  $\Delta$  выделяется  $0,864 S_a$ . Так же затухает и реактивная составляющая вектора потока энергии  $S_q$ . Поэтому в целом ряде случаев принимается, что вся электромагнитная энергия выделяется в поверхностном слое, равном глубине проникновения электромагнитной волны  $\Delta$ .

Активная составляющая вектора потока энергии на поверхности полубесконечного проводящего тела является удельной поверхностной мощностью (Вт/м<sup>2</sup>) и ее значение равно (3.9):

$$p_{0s} = 1 \cdot 10^{-3} H_0^2 \sqrt{\rho \mu} f .$$

Отметим, что  $p_{0s}$  часто используется в качестве базовой расчетной величины, а физический смысл имеет только для полубесконечного тела.

Для решения уравнения (3.25) может быть использован численный конечно-разностный метод, который реализуется в инженерной практике в виде компьютерной программы.

Интервал значений  $z$ , на котором ищется решение уравнения разбивается на  $N$  шагов шириной  $h$ .

При этом дифференциальное уравнение (3.25) заменяется системой алгебраических уравнений в конечных разностях, имеющих вид

$$\frac{\dot{H}_{i+1} - 2\dot{H}_i + \dot{H}_{i-1}}{h^2} = j\omega \frac{\mu_i}{\rho} \dot{H}_i . \quad (3.37)$$

Граничные условия в этом методе следует задавать на обеих границах интервала, т.е. полубесконечное тело необходимо заменить плитой с толщиной  $\delta$  (рис. 3.13). Обычно принимают при  $z = \delta$  значение  $\dot{H} = 0$ .

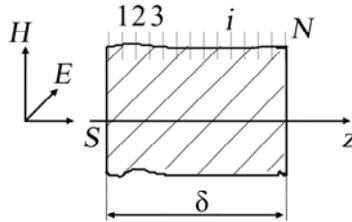


Рис. 3.13. Электромагнитная волна в проводящей плите

Значение  $\delta$  выбирается таким, чтобы возникающая при определении параметров электромагнитного поля погрешность была допустимой и, вместе с тем, чтобы длина расчетного интервала, связанная с числом шагов  $i$ , следовательно, с порядком системы алгебраических уравнений, не была бы слишком большой.

В практике инженерных расчетов обычно принимают  $\delta = (3 - 5) \Delta$ . При определении шага разбиения необходимо считаться с сильным затуханием напряженности магнитного поля и других параметров, поэтому рекомендуется выбирать шаг  $h$  из соотношения  $\Delta \approx (5 - 7) h$ .

Повышение точности расчета может быть достигнуто при использовании переменного значения шага  $h$ , которое принимается наименьшим на поверхности тела, т.е. в зоне больших значений производной  $\dot{H}$ .

Решение системы линейных алгебраических уравнений (3.37) тем или иным методом позволяет найти значения  $\dot{H}_i$ .

После определения  $\dot{H}_i$  рассчитываются значения  $\dot{E}_i$  и  $\dot{S}_i$  на каждом шаге:

$$\dot{E}_i = -\rho \frac{\dot{H}_{i+1} - \dot{H}_i}{h}, \quad (3.38)$$

$$\dot{S}_i = \frac{1}{2} \dot{E}_i \dot{H}_i^*. \quad (3.39)$$

Очевидно, что для решения дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (линейная задача) численный метод не имеет преимуществ по сравнению с аналитическим.

### 3.7.2. Влияние геометрических параметров проводящего тела

Проанализируем влияние геометрии загрузки и конфигурации электромагнитного поля на распределение  $H$  и  $E$  по координате, а также на значения активной и реактивной мощностей  $P_a$  и  $P_q$ , выделяющихся в нагреваемом теле, на конкретных примерах.

Исследуем параметры плоской электромагнитной волны в проводящей плите толщиной  $\delta$  (рис. 3.13), причем этот размер должен быть соизмерим с глубиной проникновения  $\Delta$ .

Исходным дифференциальным уравнением является уравнение (3.25). Решение этого уравнения дает формула (3.28), постоянные интегрирования  $\dot{C}_1$  и  $\dot{C}_2$  в которой определяются исходя из граничных условий.

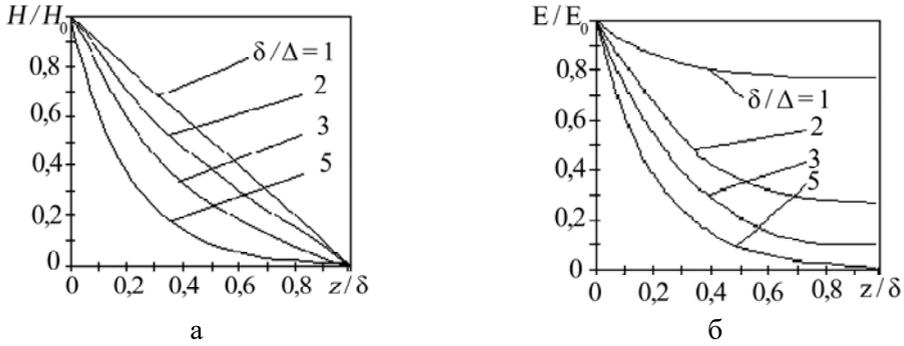
Как показано в [4], для практических задач индукционного нагрева с достаточной точностью могут быть приняты следующие приближенные выражения для  $H$  и  $E$ :

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \frac{\text{sh} \left[ \frac{1+j}{\Delta} (\delta - z) \right]}{\text{sh} \left( \frac{1+j}{\Delta} \delta \right)}; \quad (3.40)$$

$$\dot{E} = \dot{H}_0 (1+j) \frac{\rho}{\Delta} \frac{\text{sh} \left[ \frac{1+j}{\Delta} (\delta - z) \right]}{\text{sh} \left( \frac{1+j}{\Delta} \delta \right)}. \quad (3.41)$$

Здесь  $\text{sh } \zeta$  и  $\text{ch } \zeta$  – гиперболические синус и косинус данного аргумента  $\zeta$ .

Рассчитанные по формулам (3.40) и (3.41) зависимости относительных величин  $H/H_0$  и  $E/E_0$  для плиты от относительной координаты  $z/\delta$  при различных значениях параметра  $\delta/\Delta$  представлены на рис. 3.14 а, б.



**Рис. 3.14.** Зависимости относительных величин  $H/H_0$  (а) и  $E/E_0$  (б) для проводящей плиты от относительной координаты  $z/\delta$

Анализ зависимостей  $H/H_0$  и  $E/E_0$  от  $z/\delta$  для проводящей плиты позволяет сделать вывод о том, что плита толщиной  $\delta/\Delta \geq 5$  (во многих случаях  $\delta/\Delta \geq 3$ ) с достаточной для инженерной практики точностью может считаться полубесконечным телом.

Укажем, что принятое допущение о значении  $H = 0$  при  $z = \delta$  справедливо даже для весьма тонких плит, см. формулу (3.40).

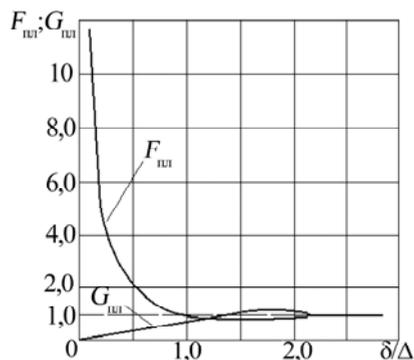
Из (3.40) и (3.41), в соответствии с формулой (3.33), получены выражения для потока энергии на поверхности плиты  $S_{пл}$  и затем для выделяющихся в плите активной и реактивной мощностей  $P_{а.пл}$  и  $P_{q.пл}$ . При этом данные выражения удобно представить с использованием ранее полученных значений  $S_0$ , а также  $P_{а\infty}$  и  $P_{q\infty}$  для полубесконечного тела и поправочных функций  $F_{пл}$  и  $G_{пл}$ :

$$\dot{S}_{пл} = \dot{S}_0 (F_{пл} + jG_{пл}), \quad (3.42)$$

$$P_{а.пл} = P_{а\infty} F_{пл}, \quad (3.43)$$

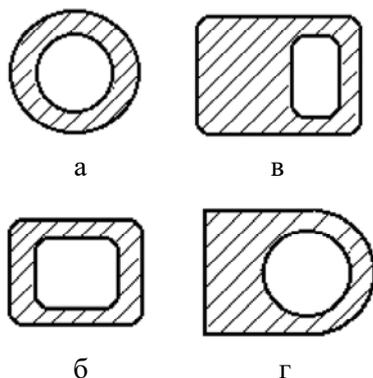
$$P_{q.пл} = P_{q\infty} G_{пл}. \quad (3.44)$$

Графики зависимостей  $F_{пл}$  и  $G_{пл}$  от относительной толщины плиты  $\delta/\Delta$  представлены на рис. 3.15.



**Рис. 3.15.** Поправочные функции  $F_{пл}$  и  $G_{пл}$  в зависимости от относительной толщины плиты  $\delta/\Delta$

Представляет интерес наличие минимума зависимости  $F_{пл}(\delta/\Delta)$ , соответствующего значению  $\delta/\Delta = 1,3$ . При этом потери в проводящей плите минимальны и поэтому толщины индуктора и электромагнитного экрана выбираются с учетом данного соотношения. Например, для водоохлаждаемого медного индуктора при частоте 50 Гц оптимальная толщина стороны трубки индуктора, обращенной к нагрузке, равна 13 мм, а при использовании средних частот оптимум составляет 2–4 мм. Промышленность выпускает как равностенные, так и специальные профили медных трубок, см. рис. 3.16.



**Рис. 3.16. Профили трубок индукторов:** равностенные (а, б) и специальные (в, г)

Для теории и практики индукционного нагрева представляет большой интерес исследование параметров цилиндрической электромагнитной волны в проводящем цилиндре. На рисунке 3.17 показана цилиндрическая система И–З и направления векторов  $H$ ,  $E$  и  $S$  на поверхности проводящего цилиндра радиуса  $r_0$ . В направлении оси  $z$  система И–З бесконечно протяженная.

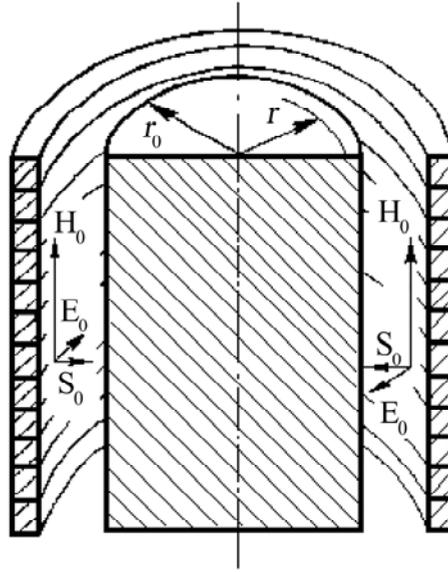


Рис. 3.17. Электромагнитная волна в проводящем цилиндре

Для расчета параметров электромагнитного поля в этом случае необходимо использовать дифференциальное уравнение (3.12), которое в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{d^2 \dot{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{H}}{dr} = k^2 \dot{H}. \quad (3.45)$$

Граничные условия формулируются следующим образом: при  $r = r_0$  значения напряженности магнитного поля  $\dot{H} = \dot{H}_0$ , при  $r = 0$  с учетом симметрии  $d\dot{H} / dr = 0$ .

Коэффициент  $k^2 = \frac{j\omega\mu_0\mu}{\rho}$  можно представить в виде  $k^2 = \left( \sqrt{j} \frac{\sqrt{2}}{\Delta} \right)^2$ .

Введем новую переменную

$$\xi = \sqrt{j} \frac{r\sqrt{2}}{\Delta}. \quad (3.46)$$

Тогда уравнение (3.45) можно записать в виде

$$\frac{d^2 \dot{H}}{d\xi^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{H}}{d\xi} - \dot{H} = 0. \quad (3.47)$$

Это дифференциальное уравнение Бесселя нулевого порядка от комплексного аргумента  $\xi$ . Его решение содержит специальные функции – функции Бесселя, которые представлены в виде табличной зависимости [4].

Напряженность магнитного поля в проводящем цилиндре:

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \frac{I_0(\dot{\xi})}{I_0(\dot{\xi}_0)}. \quad (3.48)$$

Здесь  $I_0(\dot{\xi})$  – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка и

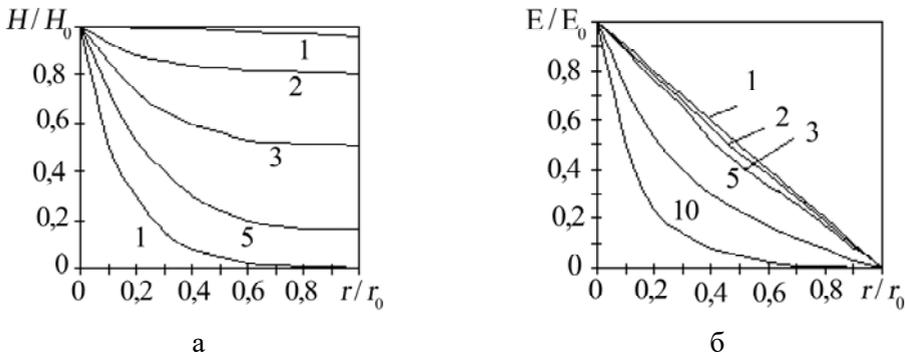
$$\dot{\xi}_0 = \sqrt{j} \frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta} - \text{значение } \dot{\xi} \text{ при } r = r_0.$$

Напряженность электрического поля в проводящем цилиндре определяется по формуле

$$\dot{E} = -\dot{H}_0 (1+j) \frac{\rho}{\Delta} \frac{I_1(\dot{\xi})}{I_0(\dot{\xi}_0)}. \quad (3.49)$$

Здесь  $I_1(\dot{\xi})$  – производная от функции Бесселя  $I_0(\dot{\xi})$ .

Рассчитанные по формулам (3.48) и (3.49) зависимости относительных величин  $H/H_0$  и  $E/E_0$  для цилиндра от относительной координаты  $r/r_0$  при различных значениях параметра  $r_0 \sqrt{2}/\Delta$  представлены на рис. 3.18 а, б.



**Рис. 3.18. Зависимости  $H/H_0$  (а) и  $E/E_0$  (б) для проводящего цилиндра от относительной координаты  $r/r_0$  (цифры у кривых – значения  $r_0 \sqrt{2}/\Delta$ )**

Отметим, что зависимости  $H/H_0$  и  $E/E_0$  для проводящего цилиндра при выполнении соотношения  $r_0 \sqrt{2}/\Delta \geq 10$  практически совпадают с подобными зависимостями для полубесконечного тела, т.е. в этом случае при расчетах можно пользоваться формулами для полубесконечного тела.

С использованием уравнений (3.48) и (3.49), в соответствие с формулой (3.33), получены выражения для потока энергии на поверхности цилиндра  $S_{ц}$  и для выделяющихся в цилиндре активной и реактивной мощностей  $P_{а.ц}$  и  $P_{q.ц}$

(на  $1 \text{ м}^2$  поверхности). Также как для проводящей плиты данные выражения для цилиндра можно представить с использованием ранее полученных значений  $S_0$ , а также  $P_{a\infty}$  и  $P_{q\infty}$  для полубесконечного тела и поправочных функций  $F_{\text{ц}}$  и  $G_{\text{ц}}$ :

$$\dot{S}_{\text{ц}} = \dot{S}_0 (F_{\text{ц}} + jG_{\text{ц}}), \quad (3.50)$$

$$P_{a,\text{ц}} = P_{a\infty} F_{\text{ц}}, \quad (3.51)$$

$$P_{q,\text{ц}} = P_{q\infty} G_{\text{ц}}. \quad (3.52)$$

Графики зависимостей  $F_{\text{ц}}$  и  $G_{\text{ц}}$  от относительного радиуса цилиндра  $r_0\sqrt{2}/\Delta$  представлены на рис. 3.19. При уменьшении значения относительного радиуса электромагнитная волна проходит сквозь проводящий цилиндр практически без выделения энергии в нем, т.е. тело является прозрачным для электромагнитного поля.

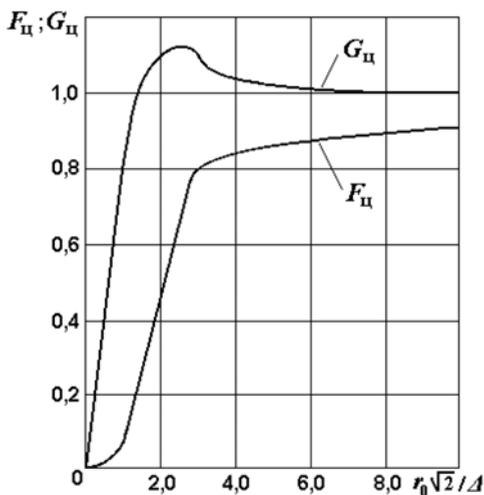


Рис. 3.19. Поправочные функции  $F_{\text{ц}}$  и  $G_{\text{ц}}$  в зависимости от относительного радиуса цилиндра  $r_0\sqrt{2}/\Delta$

Таким образом, форма проводящего тела влияет на параметры электромагнитного поля при определенных относительных размерах.

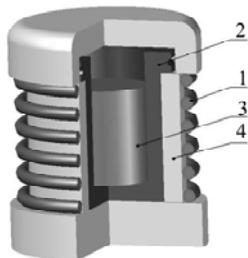
Если рассмотреть проводящую трубу с наружным радиусом  $r_0$  и толщиной стенки  $\delta$ , а значение глубины проникновения равно  $\Delta$ , то при определенных значениях  $r_0\sqrt{2}/\Delta$  (более 10) ее поверхность можно считать плоской, а при  $\delta/\Delta \geq 3$  трубу можно считать сплошной. Форма тела (расчетная) в зависимости от относительных размеров представлена ниже:

Форма тела	$r_0\sqrt{2} / \Delta$	$\delta / \Delta$
Полубесконечное тело	$\geq 10$	$\geq 3$
Плита	$\geq 10$	$< 3$
Цилиндр	$< 10$	$\geq 3$ (или $\delta = r_0$ )
Труба	$< 10$	$< 3$

В практике индукционного нагрева встречаются случаи, когда загрузка представляет собой двухслойное проводящее тело с различными электрофизическими параметрами слоев. Например, при индукционном нагреве стальных изделий под поверхностную закалку поверхностный слой нагрет до температуры выше точки Кюри ( $\mu = 1$ ), а внутренний слой сохраняет ферромагнитные свойства, т.е.  $\mu = \mu(H)$  и  $\mu \gg 1$  [4, 7]. Аналитическое решение этой задачи приведено в [4].

Индукционный нагрев двухслойной загрузки может наблюдаться и в других случаях: в индукционных тигельных печах с проводящим тиглем (немагнитным графитовым тиглем для плавки меди и сплавов, драгоценных металлов или ферромагнитным стальным тиглем для плавки магния), при нагреве биметаллических гильз с наружным слоем из материала с большим удельным сопротивлением [7, 8].

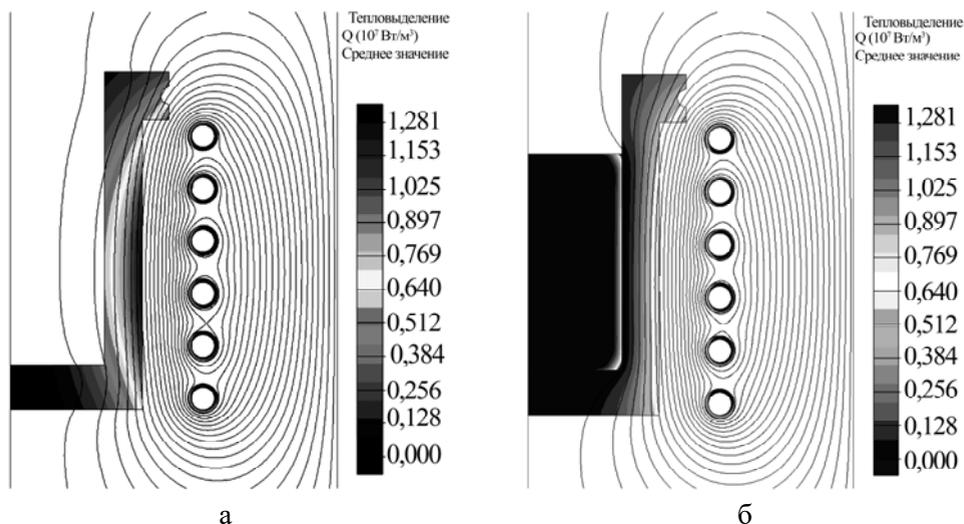
В индукционных тигельных печах с проводящим тиглем в электромагнитном поле нагреваются и тигель, и загрузка (рис. 3.20). Если толщина стенки тигля более чем в 2–3 раза превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуцированный ток сосредоточен в стенке тигля, загрузка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку, и энергия выделяется также и в ней. В этом случае можно говорить об индукционном нагреве двухслойного тела, которое образуют тигель и загрузка. При этом каждый слой имеет свои значения удельного электрического сопротивления и относительной магнитной проницаемости, что влияет на распределение выделяющейся энергии.



**Рис. 3.20. ИТП с проводящим тиглем:**

1 – индуктор; 2 – проводящий тигель; 3 – загрузка; 4 – теплоизоляция

Эффект, возникающий при индукционном нагреве двухслойного тела, слои которого имеют одинаковое значение относительной магнитной проницаемости  $\mu_1 = \mu_2$ , но различные значения удельного электросопротивления  $\rho_1 \neq \rho_2$ , наглядно иллюстрирует рис. 3.21, на котором представлены характерные распределения удельной объемной мощности тепловыделения в индукторе и загрузке печи с графитовым тиглем для плавки меди [8].



**Рис. 3.21. Распределение удельной объемной мощности тепловыделения в индукторе и загрузке печи:**

а – графитовый тигель без металла; б – графитовый тигель с медью

Из рисунка 3.21 видно, что наличие в графитовом тигле жидкой меди оказывает существенное влияние на параметры системы «индуктор – загрузка». Так, мощность тепловыделения в графитовом тигле при наличии в нем меди снижается почти на 20% при одном и том же токе индуктора, при этом мощность тепловыделения в самой меди представляет незначительную величину [8].

Это объясняется тем, что толщина стенки тигля существенно меньше глубины проникновения, а поэтому интегральное значение индуцированного тока в меди сопоставимо с суммарным током в тигле. Это приводит к тому, что появляется обратная электромагнитная волна, отраженная от границы раздела сред с различными значениями  $\rho$ , и распределение напряженности магнитного поля  $H$  по толщине стенки тигля изменяется (рис. 3.22а) [7, 8]. В связи с этим значения удельной объемной мощности тепловыделения  $p_{0V}$  в каждой точке по толщине стенки тигля уменьшаются (рис. 3.22б), что и приводит к существенному снижению мощности в тигле. При этом внутренние источники теплоты во внутреннем слое двухслойной загрузки вносят незначительный вклад в суммарную активную

мощность в загрузке в следствие относительно небольших значений  $\rho$  для внутреннего слоя. На рисунке 3.22 область, соответствующая стенке тигля, ограничена двумя вертикальными линиями [8].

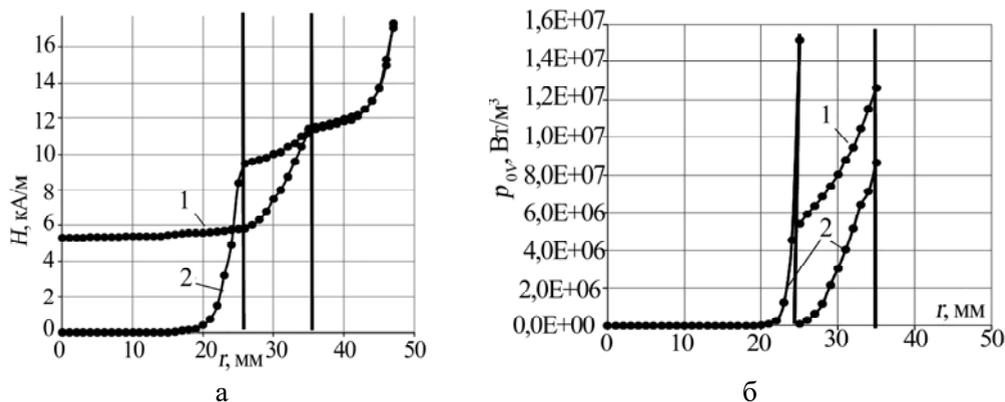


Рис. 3.22. Распределение напряженности магнитного поля  $H$  (а) и удельной объемной мощности  $p_{0V}$  (б) по радиусу  $r$  для пустого тигля (1) и тигля с жидкой медью (2)

Следует отметить, что задача расчета индукционного нагрева двухслойной среды может быть решена разными методами, в том числе описанными выше аналитическим методом (более подробно смотри [4]) и численным методом конечных разностей. При использовании последнего уравнения (3.37) записываются исходя из принадлежности участка разбиения слою двухслойной загрузки с известными электрофизическими свойствами ( $\rho$ ,  $\mu$ ).

### 3.7.3. Влияние электрофизических свойств проводящего тела

Входящие в выражения для глубины проникновения и удельной поверхностной мощности (3.8) и (3.9) электрофизические свойства проводящей среды: удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и относительная магнитная проницаемость  $\mu$ , в общем случае, не являются постоянными величинами. Изменение их в ходе нагрева приводит к изменениям электрических параметров индукционной установки и технологического режима.

Рассмотрим, в качестве примера, конструкционную ферромагнитную сталь, у которой  $\rho$  и  $\mu$  зависят от температуры  $t$ , а в интервале температур ниже точки Кюри  $t_K$  относительная магнитная проницаемость  $\mu$  зависит также от напряженности магнитного поля  $H$ , см. рис. 3.23 и рис. 3.24.

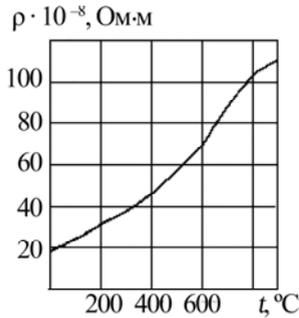


Рис. 3.23. Зависимость  $\rho$  ферромагнитной конструкционной стали от  $t$

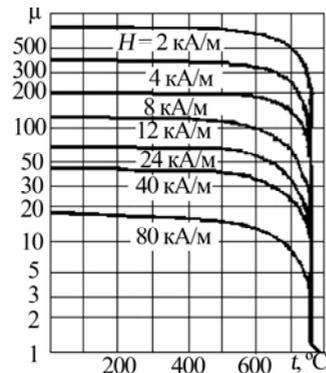


Рис. 3.24. Зависимости  $\mu$  ферромагнитной конструкционной стали от  $t$  и  $H$

При постоянной и достаточно большой напряженности магнитного поля повышение температуры приводит обычно к непрерывно ускоряющемуся уменьшению магнитной проницаемости (рис. 3.24). Если ферромагнетик намагничивается в слабом поле, проницаемость сначала возрастает с повышением температуры, а после прохождения через максимум падает до низких значений вблизи точки Кюри.

При расчете индукционного нагрева ферромагнитной конструкционной стали может быть использована приближенная формула для зависимости  $\mu(t, H)$  [6]:

$$\mu = 1 + (5 \cdot 10^5 H^{0.894} - 1) \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_K} \right)^2 \right]. \quad (3.53)$$

Используя формулы (3.8) и (3.9), можно построить зависимости  $\Delta$  и  $p_{0s}$  от температуры при индукционном нагреве ферромагнитной стали для интервала температур, включающего переход через точку Кюри  $t_K$ , см. рис. 3.25.

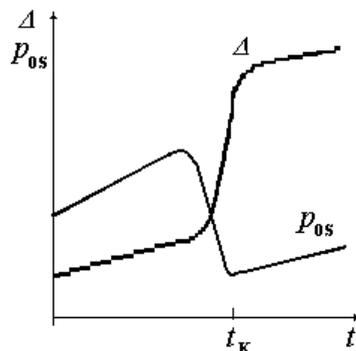


Рис. 3.25. Зависимости  $\Delta$  и  $p_{0s}$  от температуры нагрева ферромагнитной стали  $t$

Укажем, что изменения  $\Delta$  и  $p_{os}$  в ходе нагрева необходимо учитывать при расчете самих устройств индукционного нагрева и систем управления, а также при выборе источника питания. Например, при индукционном нагреве стальных деталей под поверхностную закалку поверхностный слой за короткое время прогревается до температуры выше точки Кюри, при этом температура поверхности может достигать 900 °С и выше. Толщина прогретого слоя определяет получаемую после охлаждения глубину закаленного слоя, которая задается по требованиям технологии (§ 3.10.3).

### 3.7.4. Электромагнитное поле в нелинейной проводящей среде

Основной характеристикой ферромагнитных материалов является кривая намагничивания – зависимость магнитной индукции  $B$  в ферромагнитной среде от напряженности магнитного поля  $H$ . Отличительной особенностью ферромагнетиков является магнитный гистерезис, заключающийся в том, что индукция  $B$  имеет при одной и той же напряженности поля различные значения в зависимости от того, какие магнитные поля ранее воздействовали на ферромагнитное тело. Причиной этого служат необратимые процессы при намагничивании. Если изменять напряженность магнитного поля от некоторого значения  $+H_m$  до значения  $-H_m$ , причем  $|+H_m| = |-H_m|$ , то будет получена симметричная петля гистерезиса (рис. 3.26).

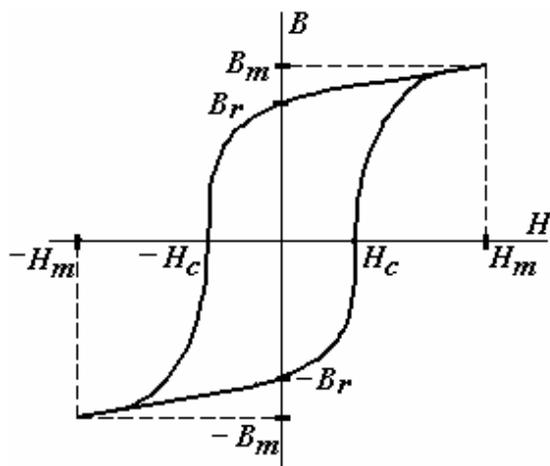


Рис. 3.26. Симметричная петля магнитного гистерезиса

Основные точки пели гистерезиса:  $B_m$  – максимальная индукция за цикл перемагничивания;  $H_m$  – максимальная напряженность магнитного поля за цикл перемагничивания;  $B_r$  – остаточная индукция – индукция в предварительно намагниченном материале при напряженности магнитного поля в нем, равной

нулю;  $H_r$  – коэрцитивная сила – величина отрицательной напряженности магнитного поля, необходимая для доведения до нуля магнитной индукции в предварительно намагниченном материале.

В процессе перемагничивания стали происходит выделение мощности за счет магнитного гистерезиса, т.е. на перемагничивание тратится часть энергии магнитного поля. На рисунке 3.27 в качестве примера представлена зависимость удельных объемных потерь на гистерезис от напряженности поля  $H$  на частоте 50 Гц для стали 10.

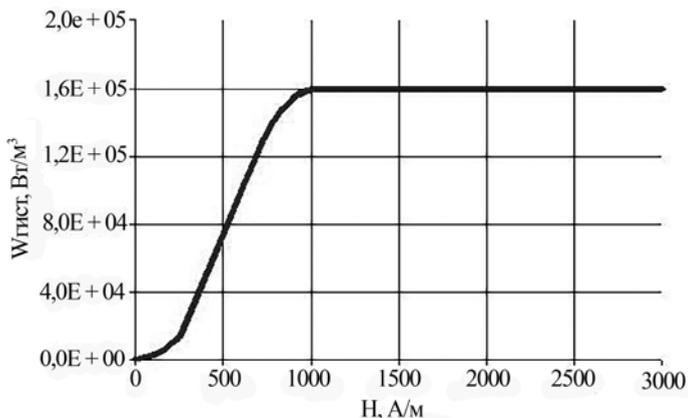


Рис. 3.27. Зависимость удельных объемных потерь на гистерезис от напряженности поля  $H$  на частоте 50 Гц для стали 10

Симметричные петли гистерезиса с разными максимальными значениями напряженности магнитного поля образуют семейство петель (рис. 3.28). Вершины симметричных петель гистерезиса образуют основную кривую намагничивания.

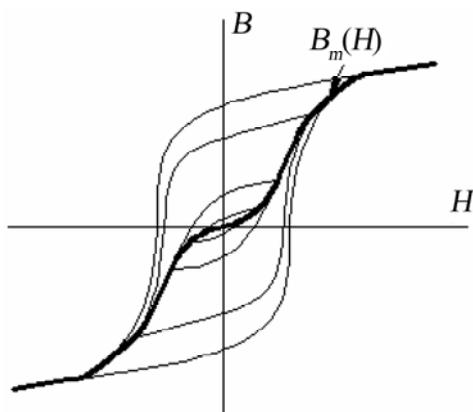
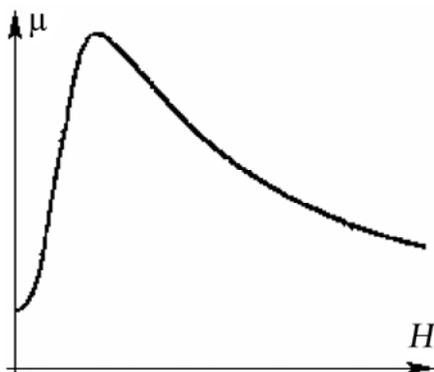


Рис. 3.28. Семейство симметричных петель гистерезиса и основная кривая намагничивания  $B_m(H)$

По основной кривой намагничивания рассчитывается зависимость относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от напряженности магнитного поля (рис. 3.29). Относительная магнитная проницаемость определяется как

$$\mu = \frac{B_m(H)}{\mu_0 \cdot H}. \quad (3.54)$$



**Рис. 3.29.** Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (кривая  $\mu(H)$ )

На магнитные свойства ферромагнитных материалов, помимо температуры и напряженности магнитного поля, оказывают влияние частота переменного намагничивающего поля, механические напряжения, имеющие место в ферромагнетике, и даже геометрические размеры ферромагнитного тела.

Нелинейность зависимости  $B(H)$  приводит к тому, что в ферромагнитной стали магнитная индукция  $B$  и напряженность магнитного поля  $H$  одновременно не могут быть синусоидально изменяющимися величинами, т.е. появляются нелинейные искажения (высшие гармоники) во временных зависимостях  $B(\tau)$  и  $H(\tau)$ . То же самое можно сказать и о временных зависимостях тока и напряжения питания устройства индукционного нагрева ферромагнитной стали. Характерные кривые мгновенных значений тока и напряжения, построенные в относительных единицах, для этого случая приведены на рис. 3.30 [9].

Значительный вклад в теорию индукционного нагрева ферромагнитных изделий внесли Л.Р. Нейман, Н.М. Родигин и А.В. Донской в 40-х и 50-х годах прошлого столетия [1]. Ими были предложены аналитические методы расчета параметров электромагнитного поля в ферромагнетиках.

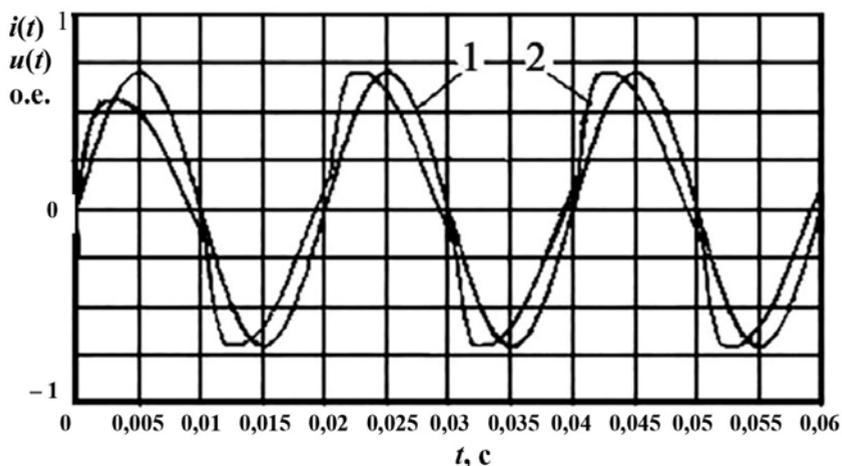


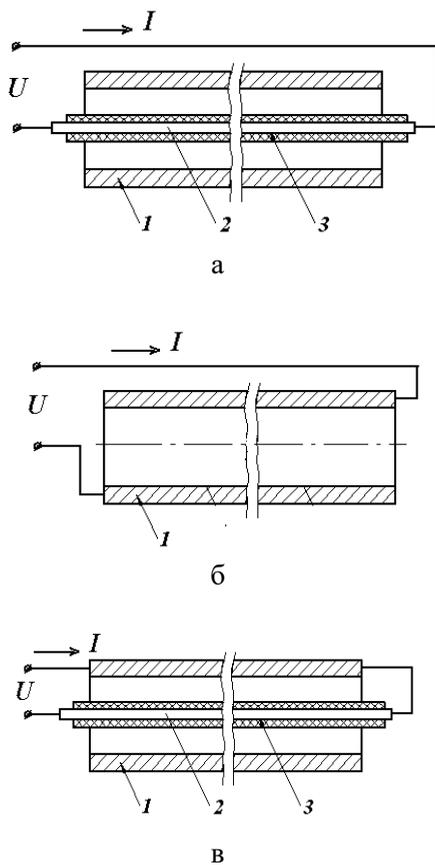
Рис. 3.30. Кривые мгновенных значений тока (1) и напряжения питания (2) устройства индукционного нагрева ферромагнитной стали

Для учета нелинейной зависимости  $\mu(H)$  Л.Р. Нейман разработал аналитический метод расчета параметров электромагнитного поля в нелинейной среде – ферромагнитной стали, см. [7, 10]. В этом методе вводится аппроксимирующая функция для зависимости  $\mu(H)$ , что позволяет найти аналитическое решение дифференциального уравнения (3.25). В результате в формулы для определения активной и реактивной мощностей, полученные из соотношений (3.35) и (3.36), подставляется значение относительной магнитной проницаемости, соответствующей значению напряженности магнитного поля на поверхности ферромагнитного тела, т.е.  $\mu_p = \mu(H_0)$ , и вводятся поправочные коэффициенты для расчета активной и реактивной мощностей (значения коэффициентов – 1,37 и 0,97 соответственно).

Отметим, что в большинстве задач практики индукционного нагрева потерями на гистерезис в ферромагнитной стали можно пренебречь. Однако всё же существуют технологические процессы (например, термообработка изделий, подогрев перед сваркой, нагрев пресс-форм, обогрев сосудов и др.), в которых нагрев стальных изделий используется, главным образом, для компенсации тепловых потерь, для чего требуются малые удельные поверхностные мощности (до  $5 \text{ кВт/м}^2$ ) и, соответственно, слабые магнитные поля ( $H < 4000 \text{ А/м}$ ). При этом на параметры электромагнитного поля начинает сказываться влияние потерь энергии на гистерезис. Отметим, что, помимо индукционного нагрева, подобный эффект характерен также для устройств электроконтактного (прямого резистивного) и комбинированного индукционно-резистивного нагрева изделий из ферромагнитной стали.

Все эти виды электронагрева в этом случае принято называть низкотемпературными, поскольку рабочие температуры для них обычно не превышают  $200^{\circ}\text{C}$ , что значительно меньше температуры точки Кюри, которая для стали составляет около  $723^{\circ}\text{C}$ .

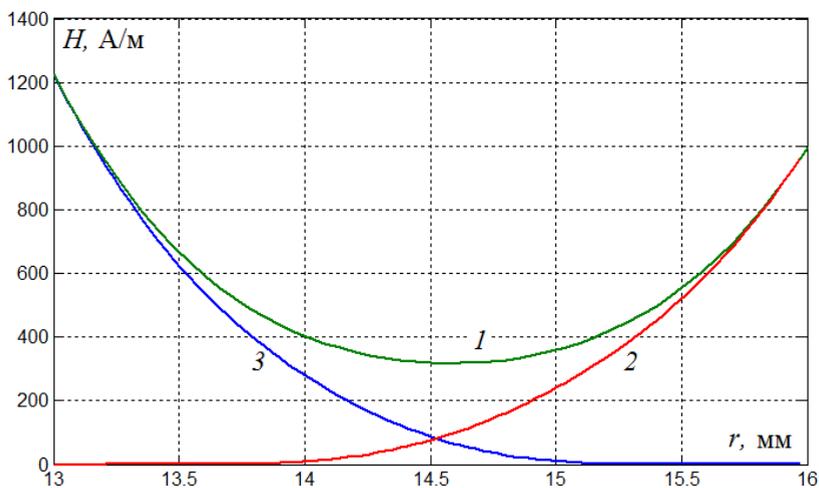
В этих случаях при расчете устройств индукционного, резистивного и комбинированного индукционно-резистивного нагрева стальных изделий на промышленной частоте, в частности труб (схемы устройств показаны на рис. 3.31), возникает задача учета мощности потерь на перемагничивание стали.



**Рис. 3.31. Эскизы устройств индукционного (а), резистивного (б) и индукционно-резистивного (в) нагрева:**  
 1 – ферромагнитная труба; 2 – стержневой индуктор; 3 – электроизоляция

На рисунке 3.32 представлены характерные распределения напряженности магнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева.

Отметим, что для рассматриваемых случаев распределение значений относительной магнитной проницаемости  $\mu$  в точках стенки трубы будет различным соответственно зависимости  $\mu$  от напряженности магнитного поля  $H$ .



**Рис. 3.32. Характеры распределения напряженности магнитного поля в стенке трубы для устройств индукционного (1), резистивного (2) и индукционно-резистивного (3) нагрева**

Для рассмотренных систем низкотемпературного электронагрева трубы из конструкционной стали вклад потерь на гистерезис в суммарную активную мощность в ферромагнитной трубе составляет при значениях напряженности магнитного поля на поверхности  $H_0$  до 2500 А/м более 24% и при  $H_0$  до 3800 А/м – более 15%. Для устройств индукционного и индукционно-резистивного нагрева значение  $H_0$  соответствует внутренней поверхности ферромагнитной трубы, для устройства резистивного нагрева – внешней поверхности трубы [11].

Большие возможности для решения нелинейной задачи открывает использование численного метода с реализацией его в виде программ для персонального компьютера. В численном методе для учета нелинейной зависимости  $\mu$  ( $H$ ) используется метод последовательных приближений (итераций). Сущность метода заключается в том, что расчет выполняется вначале для какого-то заданного распределения  $\mu$  по координате, которое корректируется после первого счета в соответствие с вычисленными значениями  $H$ . Второй расчет дает новое уточнение  $H$  и  $\mu$ . Расчеты продолжаются до тех пор, пока уточненное значение напряженности магнитного поля не будет отличаться от значения, полученного в предыдущем расчете на заданную величину, например, 1% [6, 7].

Так как в области сильных магнитных полей, характерных для индукционного нагрева, относительная магнитная проницаемость  $\mu$  возрастает с уменьшением  $H$ , то в нелинейной среде при  $\mu = \mu(H)$  электромагнитное поле затухает быстрее, чем в среде с  $\mu = \text{const}$ .

На рисунке 3.33 приведены графики зависимостей  $H$  и  $\mu$  от координаты  $z$  в полубесконечном проводящем ферромагнитном теле для двух случаев  $\mu = \mu(H)$  и  $\mu = \text{const}$ . В области слабых магнитных полей относительная магнитная проницаемость  $\mu$  с уменьшением  $H$  падает, однако это практически не влияет на энергетические характеристики процесса.

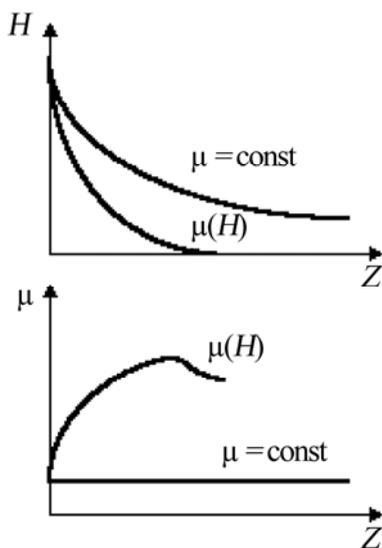
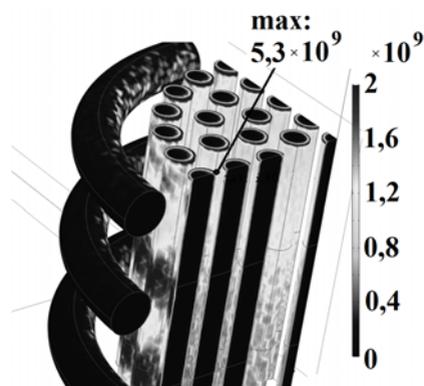


Рис. 3.33. Зависимости  $H$  и  $\mu$  от  $z$  для полубесконечного проводящего тела при  $\mu = \mu(H)$  и  $\mu = \text{const}$

При нагреве тел из ферромагнитной стали электрический КПД и коэффициент мощности системы индуктор-загрузка выше, чем при нагреве немагнитных материалов с тем же удельным электрическим сопротивлением. Отметим, что глубина проникновения в ферромагнитный материал даже на промышленной частоте невелика, что расширяет возможности эффективного применения частоты 50 Гц. При этом не требуются специальные источники питания – преобразователи частоты. Поэтому широкое распространение получил низкотемпературный индукционный нагрев ферромагнитной стали. В частности, при создании индукционных устройств косвенного нагрева в качестве материала загрузки – промежуточного нагревателя берется ферромагнитная сталь, например, в индукционных тигельных печах для плавки магнезита, химических реакторах, нагревателях жидкостей и газов и т.д.

### 3.7.5. Расчет электромагнитного поля в дискретной проводящей среде



**Рис. 3.34.** Распределение  
объемной мощности  
тепловыделения  
в расчетной области, Вт/м<sup>3</sup>

Явление проникновения электромагнитного поля в дискретную проводящую среду при нагреве совокупности дискретных проводящих объектов широко распространено в практике индукционного нагрева, например, при индукционной термообработке бетона, индукционной сушке древесины, в индукционных тигельных печах в начальный период плавки, когда загрузка представляет совокупность кусков шихты [5, 12].

Примером системы «индуктор – загрузка», соответствующей индукционному нагреву дискретной проводящей среды, является электромагнитная система, представленная на рис. 3.34.

При индукционной термообработке бетона, необходимой для ускорения процесса твердения железобетонных изделий, непосредственно в электромагнитном поле индуктора нагревается стальная арматура, а от нее теплота передается бетонной массе [5].

При индукционной сушке внутри индуктора расположен штабель древесины, в котором равномерно размещены ферромагнитные элементы, нагреваемые в электромагнитном поле [5].

В индукционных тигельных печах загрузку для плавки необходимо подготавливать с учетом рационального подбора размеров, свойств и плотности укладки в тигель. Это связано с принципом выделения тепла в больших и мелких кусках загрузки: в мелких кусках загрузки выделяется недостаточно высокая удельная мощность, что приводит к более длительному процессу плавления и, как следствие, к увеличению удельного расхода электроэнергии. Также на длительность плавки влияют плотность укладки и степень окисления шихты. Скорость плавки снизится, если куски шихты будут сильно окислены, так как наведенные токи будут замыкаться в пределах одного куска шихты, из-за плохого электрического контакта между ними. Существенного сокращения длительности плавки можно добиться путем плотной укладки шихты. Для смягчения ударов крупных кусков на дно тигля укладывается мелкая шихта. Крупные

куски выполняют функции центров тепловыделения, поскольку они, в отличие от мелких кусков, не являются прозрачными для электромагнитного поля, и его энергия в них эффективно преобразуется в тепловую энергию. Исходя из этого можно заключить, что желательнее, чтобы крупные куски шихты располагались внутри, окруженные мелкими кусками, поскольку это обеспечит наиболее эффективную теплопередачу от крупных кусков к мелким [10, 13].

Описание кусковой загрузки в виде совокупности металлических цилиндров (рис. 3.34) использовано в работах [14–15], введено допущение, что токи в цилиндрах не влияют друг на друга, т.е. во всех цилиндрах выделяется одинаковая мощность.

В [16] расчет электрического режима ИТП с кусковой шихтой осуществляется методом детализированных магнитных схем замещения. В соответствии с этим методом усредненный кусок шихты представляется в виде условного объекта, обладающего изотропией свойств только в двух направлениях – нормальном (направлении, перпендикулярном оси тигля) и тангенциальном (соответственно, по оси тигля).

В общем случае расчет такого режима работы индукционной тигельной печи представляет собой сложную трехмерную задачу. Целесообразно представлять индукционную тигельную печь в виде электромагнитной системы «индуктор – дискретная загрузка», в которой существует возможность моделирования электромагнитного поля в отдельных элементах загрузки, форма, размеры и свойства которых могут различаться. Такое представление наиболее приближено к реальным условиям работы печи. Авторами в среде *COMSOL* разработана трехмерная математическая модель такой электромагнитной системы, позволяющая рассчитывать параметры электромагнитного поля в дискретной проводящей среде. В результате исследования установлено, что электромагнитное поле эффективнее проникает в дискретную проводящую среду по сравнению со сплошной независимо от насыпной плотности и частоты. Это объясняется тем, что индуцированные токи замыкаются практически только в пределах отдельных проводящих объектов, так как последние электрически плохо контактируют друг с другом даже при большой насыпной плотности. Использование разработанной модели позволяет описать индукционный нагрев шихты с различным гранулометрическим составом и электрофизическими свойствами. В примере (рис. 3.34) приведено распределение удельной объемной мощности тепловыделения для лабораторной индукционной тигельной печи мощностью 2,5 кВт при токе 200 А, частоте 200 кГц со следующими размерами: диаметр индуктора (материал – медь) – 70 мм, высота индуктора и загрузки (немагнитная сталь с удельным электросопротивлением  $\rho = 7,086 \cdot 10^{-7}$  Ом·м) – 100 мм.

### 3.7.6. Электромагнитные волны в непроводящей среде

Для исследования электромагнитного поля в зазоре и на других непроводящих участках системы И-З, т.е. на участках 3, 4 и 5 (см. рис. 3.7), можно использовать исходное дифференциальное выражение:

$$\nabla^2 \dot{H} = -\xi^2 \dot{H}. \quad (3.55)$$

Здесь коэффициент

$$\xi = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}. \quad (3.56)$$

Уравнение (3.55) можно использовать только в случаях, когда электромагнитные волны имеют простую конфигурацию, т.е. волны плоские или цилиндрические, и можно сформулировать граничные условия.

Для цилиндрических электромагнитных волн уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2 \dot{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{H}}{dr} = -\xi^2 \dot{H}. \quad (3.57)$$

Если ввести переменную  $\xi \cdot r$ , то уравнение (3.57) представляется обычным дифференциальным уравнением Бесселя нулевого порядка и в его решение входят функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка.

Рассмотрим электромагнитное поле в пустом цилиндрическом индукторе, т.е. в индукторе без загрузки.

С учетом значений частот и радиусов индуктора, обычно применяемых в индукционных установках, выполняется условие

$$\xi \cdot r \leq 1 \cdot 10^{-2}. \quad (3.58)$$

Для таких малых значений аргумента  $\xi \cdot r$  возможна замена функций Бесселя в решении (3.57) их приближенными значениями и можно принять следующие формулы для  $H$ ,  $E$  и  $S$ :

$$\dot{H} \cong \dot{H}_0, \quad (3.59)$$

$$\dot{E} \cong j\pi\mu_0 f \dot{H}_0 r, \quad (3.60)$$

$$\dot{S} \cong -j \frac{\pi}{2} \mu_0 f \dot{H}_0^2 r. \quad (3.61)$$

Реактивная мощность в полости пустого цилиндрического индуктора с внутренним радиусом  $r_1$  на 1 м длины индуктора, кВАр/м:

$$Q = \pi^2 \mu_0 r_1^2 f H_0^2. \quad (3.62)$$

Аналогично может быть рассчитана реактивная мощность в полости цилиндрической загрузки (область 5, см. рис. 3.7). При этом, естественно, следует использовать значения напряженности магнитного поля внутри загрузки  $H_5$  и внутреннего радиуса загрузки (полости)  $r_5$ .

Реактивная мощность  $Q_3$ , кВАр в зазоре между индуктором с внутренним радиусом  $r_1$  и загрузкой с наружным радиусом  $r_2$  для цилиндрической системы индуктор-загрузка длиной  $l_1$ :

$$Q_3 = \pi^2 \mu_0 l_1 (r_1^2 - r_2^2) f H_0^2. \quad (3.63)$$

Расчет реактивной мощности в пространстве вне индуктора затруднен сложной конфигурацией электромагнитного поля при конечных размерах системы индуктор-загрузка.

В некоторых работах [5, 10] предлагается для расчета реактивной мощности в пространстве вне индуктора  $Q_4$ , кВАр использовать формулу:

$$Q_4 = \frac{K_N}{1 - K_N} \pi^2 \mu_0 l_1 r_1^2 f H_0^2. \quad (3.64)$$

При этом предполагается, что наличие загрузки в индукторе длиной  $l_1$  слабо влияет на параметры электромагнитного поля вне индуктора и что длины индуктора и загрузки приблизительно равны ( $l_1 \approx l_2$ ).

В (3.64) коэффициент Нагаока  $K_N$  определяется по графику рис. 3.35, исходя из отношения диаметра и длины индуктора  $d_1 / l_1$ . На графике рис. 3.35 верхняя кривая соответствует интервалу значений  $d_1 / l_1 = 0 - 1$ , а нижняя кривая – интервалу  $d_1 / l_1 = 1 - 10$ .

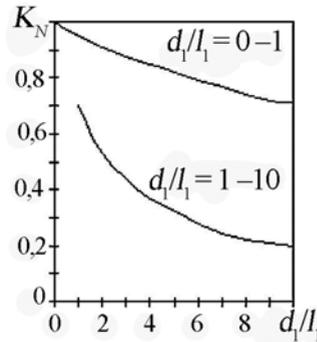


Рис. 3.35. Коэффициент  $K_N$  в зависимости от  $d_1 / l_1$

Одним из методов расчета является интегральный метод, при котором пространство вне индуктора разбивается на кольца прямоугольного сечения по координатам  $r$  и  $z$ , см. рис. 3.36.

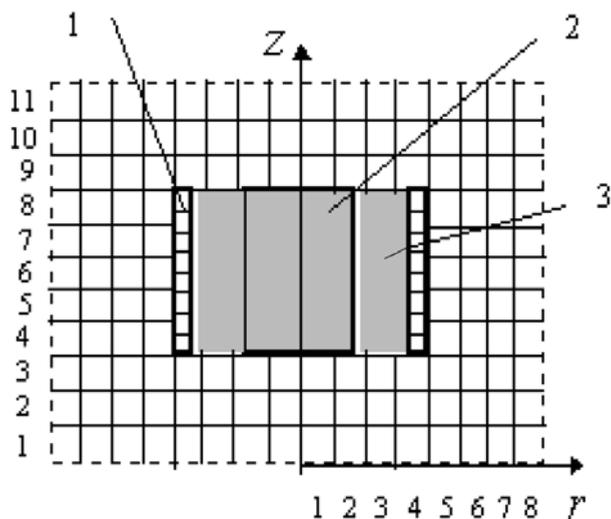


Рис. 3.36. Разбиение пространства вне индуктора на кольца:  
1 – индуктор, 2 – нагрузка, 3 – зазор

Напряженность магнитного поля внутри каждого кольца предполагается постоянной и может быть рассчитана следующим методом.

Рассмотрим вначале распределение напряженности магнитного поля, создаваемого витком радиуса  $r_0$  с током  $I_0$ , рис. 3.37.

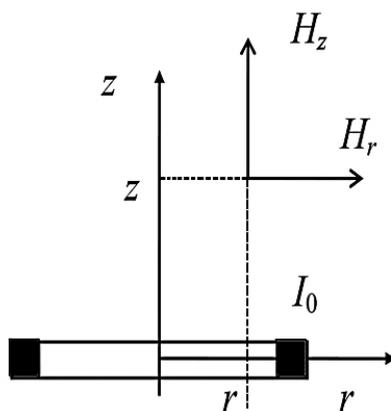


Рис. 3.37. Эскиз к расчету напряженности магнитного поля витка с током  $I_0$

Для точки в пространстве с координатами  $r$  и  $z$  (с учетом дискретизации введем обозначения номеров по осям  $i$  и  $k$ ) значения составляющих напряженности магнитного поля  $H_r$  и  $H_z$  ( $H_{ik}$ ) по координатам рассчитываются по формулам:

$$H_r = I_0 \frac{3r^2 r_0 z}{4} \left[ \frac{1}{\zeta^{3/2}} + \frac{35}{8} \frac{r^2 r_0^2}{\zeta^{9/2}} \right], \quad (3.65)$$

$$H_z = I_0 \frac{r^2}{4} \left[ \frac{2}{\zeta^{3/2}} - \frac{3r_0}{\zeta^{5/2}} + \frac{15r_0^2 r^2}{2 \zeta^{7/2}} - \frac{105r_0^4 r^2}{8 \zeta^{9/2}} \right]. \quad (3.66)$$

В этих уравнениях принято

$$\zeta = z^2 + r^2 + r_0^2. \quad (3.67)$$

Аналогично рассчитываются значения напряженностей  $H_r$  и  $H_z$ , созданных токами всех витков индуктора. Затем все рассчитанные составляющие напряженности магнитного поля по  $r$  и  $z$  суммируются и находится результирующее значение  $H_{ik}$ .

$$H_{ik} = \sqrt{H_z^2 + H_r^2}. \quad (3.68)$$

Для единичного объема пространства удельная реактивная мощность  $q_V$ , ВАр/м<sup>3</sup> рассчитывается по формуле

$$q_V = \frac{dQ_{ik}}{dV} = \frac{1}{2} \mu_0 f H_{ik}^2. \quad (3.69)$$

Реактивная мощность  $Q_{ik}$  в кольце с номером  $i, k$  объемом  $V_{ik}$ :

$$Q_{ik} = q_{V_{ik}} V_{ik} = \frac{1}{2} \mu_0 f H_{ik}^2 V_{ik}. \quad (3.70)$$

Отсюда реактивная мощность  $Q_4$  на непроводящем участке вне индуктора, состоящем из колец с номерами от  $i, k$ , равна

$$Q_4 = \sum_{ik} Q_{ik} = \sum_{ik} q_{V_{ik}} V_{ik}. \quad (3.71)$$

Отметим, что наличие электромагнитных и ферромагнитных экранов в системе индуктор – нагрузка существенно меняет конфигурацию электромагнитного поля. Для учета их влияния на реактивную мощность используются различные методы, в том числе и экспериментальные.

В [3] приведены графики для определения коэффициента  $K_N$  при наличии магнитопроводов при расчете  $Q_4$  по формуле (3.64).

### 3.8. Электромагнитные силы при индукционном нагреве

Электромагнитное поле при индукционном нагреве приводит к возникновению электромагнитных сил, действующих как на индуктор, так и на загрузку. Можно следующим образом подразделить виды силовых взаимодействий в электромагнитных полях:

- электростатические силы;
- магнитостатические силы;
- электродинамические силы.

Электростатические силы при индукционном нагреве не учитываются ввиду их незначительности.

Магнитостатические силы необходимо учитывать при индукционном нагреве ферромагнитных материалов.

Электродинамические силы проявляются во всех случаях индукционного нагрева и тем сильнее, чем больше ток индуктора и индуцированный в загрузке ток.

Для электромагнитной силы  $F$ , Н, действующей на каждый из параллельно расположенных на расстоянии  $l_{12}$  друг от друга проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ , справедлива формула:

$$F = 1,02 \cdot 10^{-8} \frac{I_1 I_2}{l_{12}^2}. \quad (3.72)$$

Так как ток переменный, то электромагнитная сила, действующая на загрузку (или индуктор), содержит согласно формуле (3.72) постоянную составляющую  $F_0$  и переменную составляющую с амплитудой  $F_m$  удвоенной частоты

$$F = F_0 + F_m \cos 2\omega t. \quad (3.73)$$

Во всех случаях электродинамическая сила направлена по направлению вектора потока энергии  $\mathbf{S}$  и, следовательно, индуктор и загрузка отталкиваются друг от друга.

В случае несимметричного расположения в индукторе загрузки на нее действует электродинамическая сила, которая может выбросить загрузку из индукционного нагревателя (рис. 3.38).

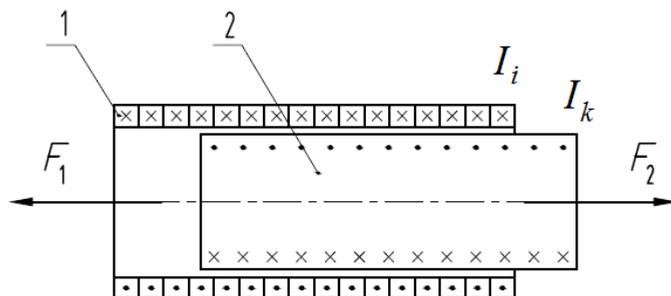


Рис. 3.38. Электромагнитная сила, выбрасывающая заготовку (2) из индуктора (1)

Воздействие электродинамических сил на индуктор приводит к возникновению сил, разрывающих индуктирующий провод (рис. 3.39), а также к вибрациям витков индуктора. Последнее связано с использованием переменного тока и неоднородностью электромагнитного поля вдоль оси индуктора. В связи с этим витки индуктора должны надежно фиксироваться, для чего применяются различные варианты крепления индуктора.

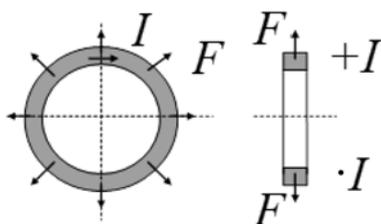


Рис. 3.39. Силы, действующие на виток с током

Некоторые примеры проявления сил при индукционной плавке металлов иллюстрирует рис. 3.40. К ним относятся мениск – выпучивание свободной поверхности расплавленного металла в тигельной печи (а) и наклон расплава в открытом канале в канальной печи (б). Под действием электромагнитных сил происходит движение расплава в индукционных плавильных печах, что выравнивает температуру и состав расплавляемого металла и, вместе с тем, приводит к ускоренному разрушению футеровки.

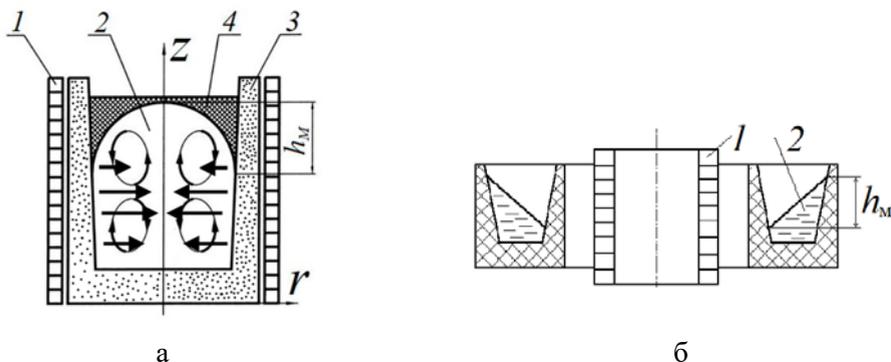


Рис. 3.40. Электромагнитные силы  
в индукционных плавильных установках:  
1 – индуктор; 2 – расплав; 3 – тигель; 4 – шлак

В индукционной тигельной печи (ИТП) расплавленный металл обжимается электромагнитным полем. Под действием электродинамических сил возникает циркуляция металла, а поверхность расплава приобретает выпуклую форму – образуется мениск (рис. 3.40, а). В средней по высоте части цилиндрического тигля, где не сказывается краевой эффект, силы электродинамического взаимодействия индуцированного тока и магнитного поля индуктора направлены радиально к оси цилиндра и убывают от максимального значения на поверхности до нуля на оси. Создаваемое этими силами давление сжатия возрастает от поверхности к оси [4, 10].

При ярко выраженном поверхностном эффекте, практически всегда имеющем место в тигельной печи, давление сжатия может быть записано в виде:

$$p_{сж} = \pi \cdot 10^{-7} \cdot H_{me}^2, \quad (3.74)$$

где  $H_{me}^2 = 2p_0\Delta_2 / \rho_2$  – квадрат амплитуды напряженности магнитного поля в зазоре, для ИТП  $H_{me}$  составляет  $10^4$ – $10^5$  А/м;  $p_0$  – удельная поверхностная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  $\rho_2$  – удельное сопротивление расплава, Ом·м.

Следовательно, выражению для  $p_{сж}$  может быть придан вид

$$p_{сж} = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot p_0 \cdot \Delta_2 / \rho_2 = 3,16 \cdot 10^{-4} \cdot p_0 / \sqrt{\rho_2 f}. \quad (3.75)$$

Из формулы (3.75) видно, что при неизменной мощности, передаваемой в расплав, силовое воздействие на него усиливается с понижением частоты.

Тигельная печь представляет собой относительно короткую электромагнитную систему (отношение высоты загрузки к диаметру редко превосходит 1,5), поэтому электродинамические силы направлены строго радиально только в средней по высоте части тигля. Ближе к верхнему и нижнему краям тигля, где магнитное поле искажается и линии его не идут параллельно оси, радиальная составляющая электродинамических сил уменьшается, как показано горизонтальными стрелками на рис. 3.40, а. Под действием такой системы сил металл в средней части тигля перетекает от периферии к оси, затем по оси тигля выжимается вверх к зеркалу ванны и вниз ко дну тигля. Вверху и внизу он перетекает к стенкам и вдоль стенок возвращается к средней части тигля, совершая так называемую двухконтурную циркуляцию.

Сам факт электродинамической циркуляции металла, которая может быть весьма интенсивной, является достоинством ИТП, выгодно отличающим ее от дуговой печи. Циркуляция ускоряет расплавление, выравнивает температуру и химический состав ванны, способствует взаимодействию металла со шлаком.

Однако описанная двухконтурная циркуляция имеет и серьезные недостатки. Во-первых, в каждом из контуров, т.е. в верхней и нижней половинах ванны, металл циркулирует раздельно, слабо смешиваясь. Во-вторых, на поверхности ванны образуется выпуклый мениск, с возрастанием высоты которого приходит-

ся увеличивать количество шлака, поскольку он должен полностью покрывать поверхность металла. При этом шлак взаимодействует с огнеупором тигля в широком поясе, разъедая его и способствуя загрязнению ванны. Кроме того, при увеличении количества шлака он получается более холодным, поскольку в индукционной печи шлак нагревается только путем теплопередачи от металла. Понижение температуры шлака замедляет протекание химических реакций и увеличивает продолжительность плавки. Как правило, высота мениска  $h_m$  (рис. 3.40, а) не должна превышать 15% полной высоты металла по оси тигля.

При радиальном направлении электродинамических сил по всей высоте тигля высота мениска определяется из условия равенства электродинамического давления на оси тигля  $p_{сж}$  и гидростатического давления столба металла высотой  $h_m$ :

$$h_m = p_{сж} / (9,81\gamma) = 0,32 \cdot 10^{-4} \cdot p_0 / (\gamma \sqrt{\rho_2 f}), \quad (3.76)$$

где  $\gamma$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>.

При реальной картине поля высота мениска получается несколько меньшей, чем та, что следует из формулы (3.76).

Форма расплава определяет энергетические и электрические характеристики установки с ИТП и оказывает как положительное, так и отрицательное влияние на технологический процесс. С увеличением высоты мениска приходится увеличивать количество шлака, поскольку он должен полностью покрывать поверхность ванны расплава, что приводит к увеличению площади поверхности тигля, которая взаимодействует со шлаком. Это способствует разъеданию тигля и загрязнению ванны расплава. При этом сам шлак получается более холодным, что замедляет протекание химических реакций и увеличивает продолжительность плавки. Однако явление мениска при определенных условиях может способствовать и увеличению скорости расплавления шихты, вносимой в жидкую ванну.

Более сложное силовое воздействие оказывает электромагнитное поле на ферромагнитную загрузку, которое заключается в одновременном действии электродинамических и магнитостатических сил. Отметим, что магнитостатическая сила приводит к притяжению загрузки к индуктору (для соленоидального индуктора – к втягиванию загрузки в индуктор) и, таким образом, электродинамическая  $F_э$  и магнитостатическая  $F_m$  силы направлены в разные стороны. Направление результирующей силы

$$F_\Sigma = F_э - F_m \quad (3.77)$$

определяется соотношением сил  $F_э$  и  $F_m$ . На практике при низкотемпературном нагреве ферромагнитной стали на промышленной частоте преобладает магнитостатическая сила.

## 3.9. Индукционные плавильные печи

### 3.9.1. Индукционные тигельные печи

*Индукционные тигельные печи* (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов (главным образом для плавки высококачественных сталей и других специальных сплавов), как на воздухе, так и в вакууме, и в защитных атмосферах, требующих особой чистоты, однородности и точности химического состава, что недостижимо при плавке в пламенных и дуговых печах.

В основе работы тигельной печи лежит трансформаторный принцип передачи энергии индукцией от первичной цепи ко вторичной. Подводимая к первичной цепи электрическая энергия переменного тока превращается в электромагнитную, которая во вторичной цепи переходит снова в электрическую, а затем в тепловую.

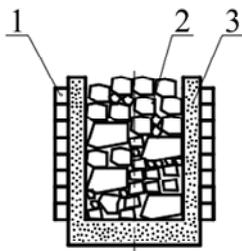
Индукционные тигельные печи также называют индукционными печами без сердечника. Печь представляет собой плавильный тигель, как правило, цилиндрической формы, выполненный из огнеупорного материала и помещенный в полость индуктора, подключенного к источнику переменного тока (рис. 3.41). Металлическая шихта (материал, подлежащий плавлению) загружается в тигель и, поглощая электрическую энергию, плавится. В тигельной печи (рис. 3.41) первичной обмоткой служит индуктор, обтекаемый переменным током, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – сам расплавляемый металл, загруженный в тигель и помещенный внутрь индуктора.

Магнитный поток в тигельной печи проходит в той или иной степени по самой шихте. Поэтому для работы печи без сердечника имеют большое значение магнитные свойства, а также размеры и форма кусков шихты.

Когда в качестве шихты применяют ферромагнитные металлы, то до того момента, пока их температура еще не достигла точки Кюри, т.е.  $\sim 740 \div 770^\circ\text{C}$ , их магнитная проницаемость сохраняет свою величину. В этом случае шихта будет играть роль не только вторичной обмотки и нагрузки, но и незамкнутого сердечника. Иначе говоря, при плавке в тигельной печи ферромагнитных металлов разогрев шихты в первый период (до точки Кюри) произойдет не только за счет тепла, выделяемого от циркуляции в ней вихревых токов, но и за счет потерь на ее перемагничивание, которое в этот период наблюдается в шихте. После точки Кюри ферромагнитные тела теряют свои магнитные свойства, и работа индукционной печи становится аналогичной работе воздушного трансформатора, т.е. трансформатора без сердечника.

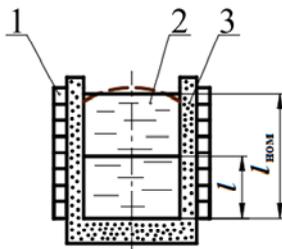
*Тигельная печь по принципу действия подобна воздушному трансформатору.*

По проводимому технологическому процессу ИТП могут быть разделены на печи, работающие на кусковой загрузке (в т.ч. ферромагнитной), печи, работающие на расплаве (миксеры и ИТП с «болотом») и ИТП с проводящими тиглями (рис. 3.41 – 3.43).



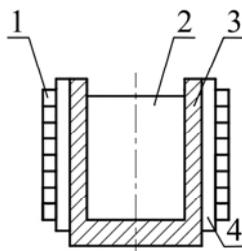
**Рис. 3.41. Эскиз ИТП, работающей на кусковой загрузке:**

1 – индуктор; 2 – кусковая загрузка; 3 – тигель



**Рис. 3.42. Эскиз ИТП, работающей с расплавом:**

1 – индуктор; 2 – расплав; 3 – тигель



**Рис. 3.43. Эскиз ИТП с проводящим тиглем:**

1 – индуктор; 2 – загрузка;  
3 – проводящий тигель; 4 – теплоизоляция

К первой группе относятся печи с диэлектрическим керамическим тиглем, работающие с дискретной загрузкой (кусовой шихтой) и предназначенные для выплавки черных, а также цветных металлов и сплавов. В таких ИТП проводящая электрический ток шихта, помещенная в тигель печи (рис. 3.41), подвергается воздействию этого поля и нагревается вследствие теплового воздействия наведённых токов проводимости, тигель же эквивалентен воздушному зазору.

Поскольку плавка в таких ИТП происходит очень быстро, шихта для нее используется, как правило, из высококачественного металлотома известного состава. Перед плавкой происходит точный расчёт шихты по содержанию углерода, серы и фосфора, а также легирующих элементов. Шихту загружают в тигель таким образом, чтобы она плотно заполняла весь объём тигля. После загрузки шихты ИТП запускают на полную мощность. По мере проплавления шихты загружают оставшуюся часть. Затем на поверхность металла загружают шлакообразующую смесь, состоящую из извести, магнезитового порошка и плавикового шпата. В процессе плавки шлак раскисляют добавками порошка кокса и молотого раскислителя. По ходу плавки добавляют легирующие материалы. Металл раскисляют кусковыми ферросплавами и в конце плавки алюминием.

Во второй группе печей можно выделить ИТП с «болотом» и индукционные тигельные миксеры (ИТМ). При плавке с «болотом» для повышения энергоэффективности ИТП необходим правильный подбор уровня расплава при запуске печи и дальнейшая регулировка мощности при режимах слива части металла, после расплавления и дозагрузки кусковой шихты.

ИТМ (рис. 3.42) широко используются в литейном производстве для термостатирования и выравнивания химического состава расплава различных металлов (чугуны, стали, цветные металлы и сплавы на их основе). В зависимости от конкретного технологического процесса производства отливок заполнение ИТМ жидким металлом может быть различным (рис. 3.42). Конструктивно миксер не отличается от плавильной ИТП. Отличия состоят лишь в величинах установленной мощности и, как следствие, удельной поверхностной мощности, воспринимаемой загрузкой.

При этом характерной особенностью ИТМ является работа с переменным уровнем расплава, изменяющимся в широких пределах (100–10% от номинального), что оказывает влияние на электрические (электрический КПД, коэффициент мощности), тепловые (тепловые потери) и магнитостатические (высота мениска) параметры и предъявляет специфические требования к системе управления.

К третьей группе относятся печи со стальным, графитовым или графитошамотным тиглем, обладающим большей или меньшей электропроводностью. Печи с проводящим тиглем (рис. 3.43) имеют теплоизоляцию. Наиболее широко применяются открытые ИТП средней и промышленной частоты для плавки цветных металлов с низким удельным электрическим сопротивлением (медь, магний и др.), урана, золота, а также непроводящих материалов. Если толщина стенки тигля более чем в 2–3 раза превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуцированный ток сосредоточен в стенке тигля, загрузка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку, и энергия выделяется также и в ней. В этом случае можно говорить об индукционном нагреве двухслойного тела, которое образуют тигель и загрузка. Тот факт, что при определенных условиях загрузка ИТП с проводящим тиглем представляет собой двухслойное тело, является существенным отличием от ИТП с непроводящим тиглем.

Мощность, а, следовательно, и тепло, выделяемое вихревыми токами, которые наводятся и циркулируют в садке, зависят от частоты переменного магнитного поля. При промышленной частоте 50 Гц концентрация энергии, выделяемой вихревыми токами, незначительна и не превышает [17] несколько ватт на 1 см<sup>2</sup> поверхности. Поэтому для эффективной работы печи без сердечника приходится питать их токами повышенной, а в отдельных случаях и высокой частоты, что достигается установкой специальных генераторов частоты.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования печей без сердечника, частота питающего тока может быть соответственно понижена в зависимости от диаметра садки, т.е. емкости печи, и удельного сопротивления расплавляемого металла. В частности, этими исследованиями определены следующие основные положения, которые позволили значительно упростить установку печей без сердечника:

- каждой емкости печи и сопротивлению шихты соответствует своя оптимальная частота питающего тока. При частоте, ниже оптимальной, КПД печи сильно понижается, выше оптимальной – почти не изменяется;

- с увеличением емкости печи частоту тока можно соответственно снизить.

В результате анализа отмеченных выше факторов (диаметра садки и сопротивления шихты), влияющих на частоту питающего тока, было получено уравнение, которое дает минимальное значение частоты для данного металла и диаметра садки [4, 5]:

$$f_{\min} \geq \frac{25 \cdot 10^8 \cdot \rho_2}{d^2}, \quad (3.78)$$

где  $f_{\min}$  – минимальная частота тока, Гц;  $\rho_2$  – удельное сопротивление расплавленного металла;  $d$  – диаметр садки.

Ток повышенной частоты, проходя через индуктор печи, обеспечивает наведение в садке ЭДС индукции, которая в плоскостях, параллельных плоскости витков обмотки, вызовет вихревые токи.

Вследствие поверхностного эффекта эти наведенные в садке токи достигают максимальной величины на внешней поверхности последней и значительно уменьшаются от краев к середине. Такое уменьшение плотности тока по мере удаления от поверхности к центру происходит по сложному закону (комбинация функций Бесселя).

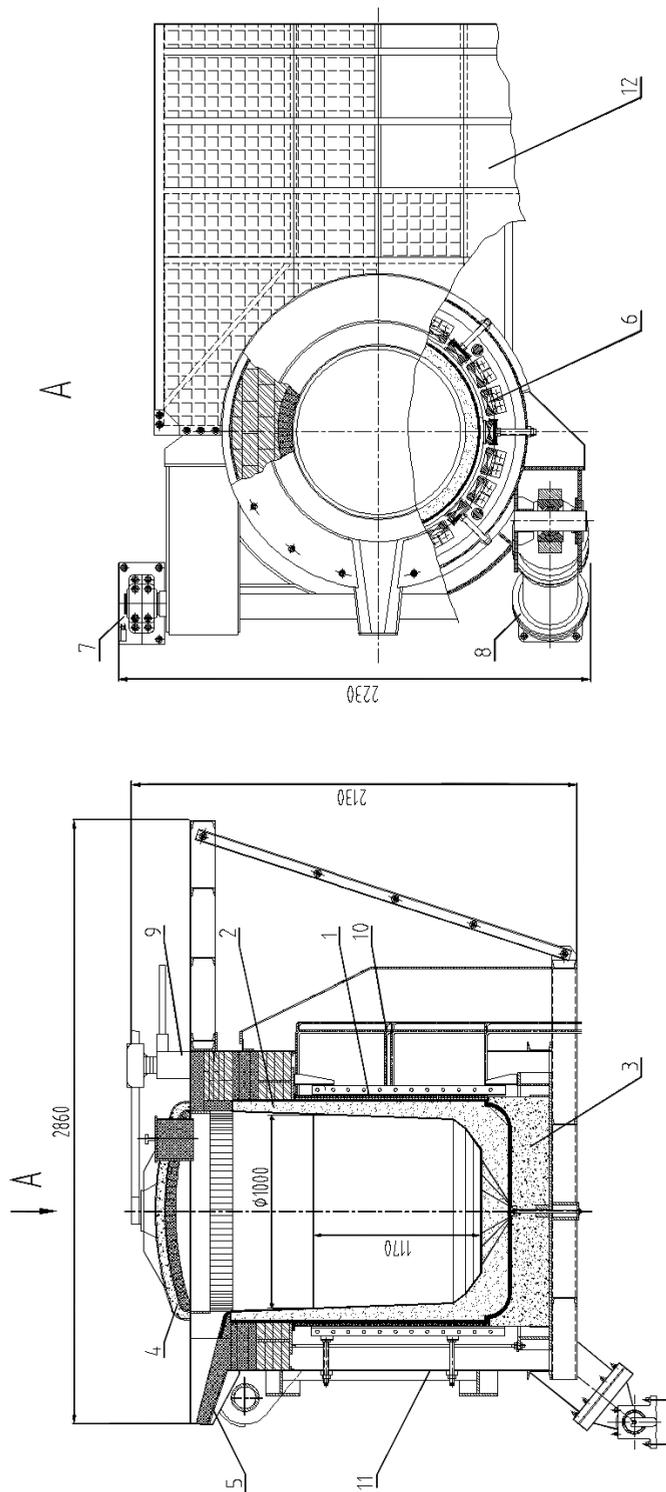
В качестве примера в табл. 3.4 приведены технические данные некоторых тигельных индукционных печей [17–20], на рис. 3.44, 3.45 – индукционные тигельные печи для плавки алюминия емкостью 2,5 т и для плавки стали емкостью 6 т соответственно.

Емкости современных ИТП находятся в диапазоне  $G = 0,5 \text{ кг} - 100 \text{ т}$ , мощности –  $P = 10 - 20 \text{ МВт}$ , частоты –  $f = 50 - 440 \text{ кГц}$ , электрический КПД –  $\eta = 0,6 - 0,8$ , коэффициент мощности –  $\cos \varphi = 0,05 - 0,2$ .

Таблица 3.4

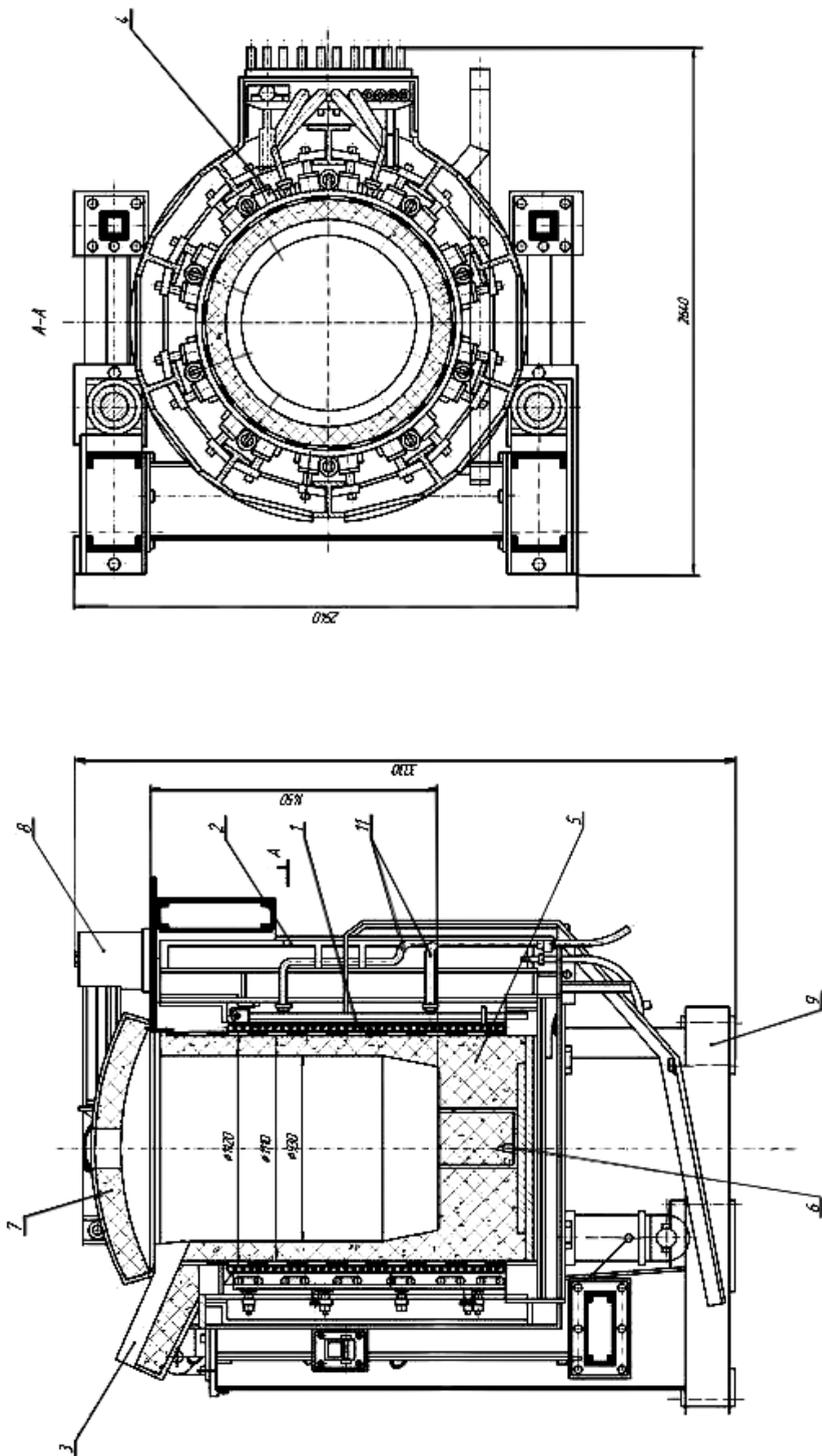
### Технические данные некоторых тигельных индукционных печей

Наименование и назначение печи	Тип печи	Ем- кость печи, т	Мощность печи, кВт	Частота, Гц	Напряжение на индукторе, В	Мощность конд. бата- рей, кВАр	Макс. рабочая температура, °С	Макс. про- изводитель- ность, кг/ч	Уд. расход э/э на расшив- ление, кВт·ч/т	Габаритные размеры, мм		Масса печи, т	
										в плане	высота		
Индукционная тигельная для плавки стали	ИСТ-1,0	1,0	790	1000	2000	15600	1650	1330	625	2700×2120	3800	6,5	
	ИСТ-2,5	2,5	2350	500	1910	22500	1600	4000	600	3000×2850	3740	15,4	
	ИСТ-6	6,0	2330	500	1500	45000	1650	3500	600	—	—	—	
Индукционная тигельная для плавки чугуна	ИЧТ-2,5	2,5	910	50	980	—	1400	1700	550	3164×3000	—	—	
	ИЧТ-6	6,0	1600	50	1000	—	1400	2200	546	4815×3120	—	—	
Индукционный тигельный миксер для перетрева чугуна	ИЧТМ-6	6,0	370	50	500	—	1400	6000	52	3815×3120	—	—	
	ИЧТМ-10	10,0	840	50	1255	—	1400	17600	48	4095×3600	—	—	
Индукционная тигельная для плавки алюминия и его сплавов	ИАТ-0,4	0,4	170	50	340	—	750	230	745	2500×2240	—	—	
	ИАТ-1	1,0	320	50	485	—	750	1300	580	3164×3000	—	—	
Индукционная тигельная для плавки меди и ее сплавов	ИАТ-6	6,0	1400	50	1050	—	750	2000	560	4845×4000	—	—	
	ИЛТ-1	1,0	325	50	485	—	1200	1000	380	2500×2240	—	—	
	ИЛТ-2,5	2,5	720	50	980	—	1200	2000	355	3164×3000	—	—	
<i>Вакуумные печи</i>	ИЛТ-10	10,0	1290	50	1050	—	1200	3600	350	4095×3600	—	—	
	Индукционная вакуумная для плавки стали и жаропрочных сплавов периодического и полупрерывного действия	ИВБ-0,06ПИ	0,06	155	2400	800	1760	1800	67	2500	7110×3890	4130	7,0
		ИВБ-0,16ПИ	0,16	157	2400	800	4400	1700	107	2170	7110×4690	4130	7,9
		ИВБ-0,16НИ	0,16	435	2400	800	4400	1650	200	2100	9800×8000	5800	35,2
		ИВБ-1,0НИ	1,0	1000	1000	1000	8600	1650	445	2000	17500×13850	12200	162,0
ИВБ-2,5НИ		2,5	1500	1000	1000	20000	1800	750	2000	17500×13850	12200	162,0	
Индукционная вакуумная для плавки алюминия	ИАВ-0,06ПИ	0,06	50	2400	475	—	800	10	—	—	—	—	
Индукционная тигельная для плавки меди и ее сплавов	ИМВ-0,16ПИ	0,16	162	2400	445	—	1300	64	—	—	—	7,28	



**Рис. 3.44. Индукционная тигельная печь типа ИАТ-2,5 для плавки алюминиевых сплавов:**

- 1 – индуктор; 2 – тигель; 3 – подина; 4 – крышка; 5 – лёточная керамика; 6 – пакеты магнитопровода;  
 7 – установка подшипников; 8 – плунжер механизма поворота; 9 – механизм подъема крышки;  
 10 – подвод водоохлаждения; 11 – кожух печи; 12 – рабочая площадка



**Рис. 3.45. Общий вид индукционной тигельной печи типа ИСТ-6:**  
 1 – индуктор; 2 – ковш печи; 3 – лёгочная керамика; 4 – пакеты магнитопровода;  
 5 – тигель; 6 – донный электрод; 7 – крышка; 8 – механизм подъема крышки;  
 9 – рама основания; 11 – подвод водоохлаждения

Основными конструктивными узлами открытой экранированной тигельной печи (например, рис. 3.44) являются футеровка, индуктор, корпус, крышка, контактное устройство, механизм наклона. Футеровка печи включает в себя тигель, подину и лёгочную керамику, соединение которой с верхним краем тигля выполняется с помощью обмазки.

Плавильный *тигель* является одним из самых ответственных узлов печи, в значительной степени определяющим ее эксплуатационную надежность. К тиглю предъявляются высокие требования: он должен выдерживать большие температурные напряжения (градиент температуры в стенке тигля достигает 200 К/см), а также гидростатическое давление столба расплава и механические нагрузки, возникающие при загрузке и осаживании шихты. Кроме того, тигель должен быть химически стоек по отношению к расплавленному металлу и шлаку и неэлектропроводен при рабочей температуре. Тигель должен иметь по возможности минимальную толщину стенки для получения высокого значения электрического КПД. Материал тигля должен иметь малый коэффициент линейного объемного расширения для исключения возникновения трещин в тигле в условиях высоких значений градиента температур в стенке (до  $3 \cdot 10^4$  °С/м) и для снижения термических напряжений в тигле. Стойкостью тигля определяется продолжительность эксплуатации печи, т.е. суммарное время плавов между сменами футеровки.

Существует большое число рецептов футеровок для ИТП. Выбор рецептуры и гранулометрического состава футеровочных материалов определяется свойствами выплавляемого металла или сплава.

Футеровка печей для плавки черных металлов может быть кислой (на основе кремнезема  $\text{SiO}_2$ ), основной (на основе плавленого магнезита  $\text{MgO}$ ) или нейтральной (на основе глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

*Достоинства* тигельных плавильных печей: 1) выделение энергии непосредственно в загрузке, без промежуточных нагревательных элементов; 2) интенсивная электродинамическая циркуляция расплава в тигле, обеспечивающая быстрое плавление мелкой шихты и отходов, быстрое выравнивание температуры по объему ванны и отсутствие местных перегревов и гарантирующая получение многокомпонентных сплавов, однородных по химическому составу; 3) принципиальная возможность создания в печи любой атмосферы (окислительной, восстановительной, нейтральной) при любом давлении (вакуумные или компрессионные печи); 4) высокая производительность, достигаемая благодаря высоким значениям удельной мощности (особенно на средних частотах); 5) возможность полного слива металла из тигля и относительно малая масса футеровки печи, что создает условия для снижения тепловой инерции печи благодаря уменьшению тепла, аккумулированного футеровкой;

б) печи этого типа весьма удобны для периодической работы с перерывами между плавками и обеспечивают возможность для быстрого перехода с одной марки сплава на другую; 7) простота и удобство обслуживания печи, управления и регулирования процесса плавки, широкие возможности для механизации и автоматизации процесса; 8) высокая гигиеничность процесса плавки и малое загрязнение воздушного бассейна.

Необходимо отметить следующие *недостатки* тигельных печей: 1) относительно низкая температура шлаков, наводимых на зеркало расплава с целью его технологической обработки (относительно холодные шлаки затрудняют протекание реакций между металлом и шлаком и, следовательно, затрудняют процессы рафинирования, шлак в ИТП, индифферентный к электрическому току, нагревается только от расплавляемого металла, поэтому его температура всегда ниже); 2) сравнительно низкая стойкость футеровки при высоких рабочих температурах расплава и при наличии теплосмен (резких колебаний температуры футеровки при полном сливе металла); 3) высокая стоимость электрооборудования, особенно при частотах выше 50 Гц; 4) более низкий КПД всей установки вследствие необходимости иметь в установке источник получения высокой или повышенной частоты, а также конденсаторов, а также при плавке материалов с малым удельным сопротивлением.

Сочетанием таких качеств (высокая стоимость электрооборудования и низкий КПД) определяется область применения индукционных тигельных печей: плавка легированных сталей и синтетического чугуна, цветных тяжелых и легких сплавов, редких и благородных металлов. Поскольку область применения этих печей ограничивается не техническими, а экономическими факторами, по мере увеличения производства электроэнергии она непрерывно расширяется, захватывая все более дешевые металлы и сплавы.

В зависимости от электрических свойств материала тигля различают *индукционные печи с непроводящим* (рис. 3.41, 3.42) и *проводящим* (рис. 3.43) *тиглем*.

Индуктор и футеровка, основной частью которой является тигель, укрепляются в корпусе печи. Конструктивные детали корпуса располагаются вне индуктора на небольшом расстоянии от него, т.е. в области, пронизываемой магнитным потоком индуктора на пути его обратного замыкания. Поэтому в металлических деталях корпуса могут возникать вихревые токи, вызывающие нагрев.

Для уменьшения потерь в корпусе у печей небольшой емкости основные детали корпуса изготавливаются из непроводящих материалов. Возможно также удаление металлических узлов корпуса на большее расстояние от индуктора, в область более слабого поля.

Однако такое конструктивное решение приводит к резкому увеличению габаритов печи и потому приемлемо лишь для печей самой малой емкости. У печей значительной емкости приходится узлы несущей конструкции защищать от внешнего поля индуктора.

Для защиты используют магнитопровод в виде вертикальных пакетов трансформаторной стали, располагающихся вокруг индуктора, или электромагнитный экран между индуктором и корпусом в виде сплошного кожуха из листового материала с малым удельным сопротивлением; потери в таком экране невелики.

Таким образом, *в соответствии с методом снижения потерь в корпусе индукционные тигельные печи делятся на три класса:*

- а) *неэкранированные;*
- б) *с магнитопроводом;*
- в) *с электромагнитным экраном.*

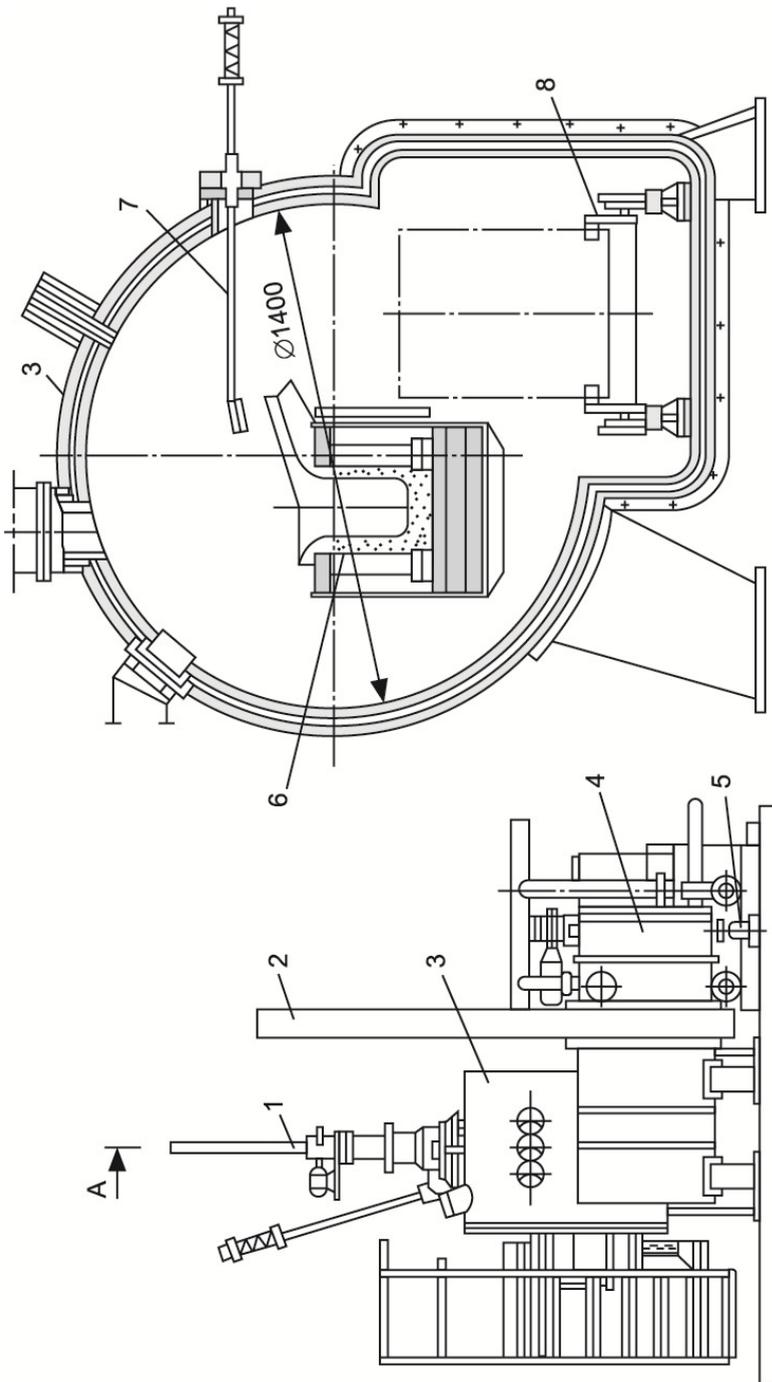
Крупные тигельные печи работают на частоте 50 Гц; с уменьшением емкости печи частота тока должна повышаться, чтобы сохранилось соотношение между глубиной проникновения тока и диаметром загрузки, обеспечивающее высокий КПД индуктора.

*По частоте питающего тока индукционные тигельные печи можно классифицировать следующим образом:*

- а) *высокочастотные* с питанием от транзисторных преобразователей частоты и ламповых генераторов;
- б) *работающие на частоте 500 – 10000 Гц* с питанием от вентильных преобразователей частоты (тиристорные или транзисторные);
- в) *работающие на частотах 150 и 250 Гц* с питанием от статических умножителей частоты;
- г) *работающие на частоте 50 Гц* с питанием от сети через электропечной трансформатор; при значительной мощности оборудованные симметрирующими устройствами.

Керамический тигель ИТП имеет простейшую форму и надежен в эксплуатации. По этой причине тигельная печь является самым распространенным типом индукционной печи.

По *характеру рабочей среды* индукционные тигельные печи можно разделить на *открытые*, работающие в атмосфере, и *вакуумные*. Конструкции вакуумных печей (рис. 3.46) обеспечивают как плавку, так и разливку металла в вакууме, благодаря чему содержание растворенных в металле газов получается очень низким.



**Рис. 3.46. Чертеж вакуумной ИТП:**

- 1 – камера загрузки шихты, отделяемая вакуумным затвором; 2 – вакуумный затвор; 3 и 4;
- 3 – камера плавильная; 4 – камера загрузки формы; 5 – откачная система; 6 – плавильная печь емкостью 25 кг;
- 7 – устройство для очистки тигля; 8 – тележка для перемещения форм

Плавка в вакууме применяется для получения особо чистых металлов и сплавов. При вакуумной плавке интенсивно удаляются газы и вредные примеси, содержащиеся в исходных материалах. Кроме того, присаживаемые компоненты почти полностью входят в сплав, а не теряются, как при плавке на воздухе, за счет образования окисных и нитридных соединений, не растворимых в металле. Вакуумная печь имеет герметичный кожух, присоединяемый к системе откачки воздуха.

Помимо указанных выше, современные вакуумные печи имеют различные приспособления, позволяющие без нарушения вакуума производить необходимые технологические операции: бункера для дополнительных порций шихты, дозаторы для введения в тигель в определенном порядке присадочных материалов, устройства для измерения температуры жидкого металла термпарой и для взятия его проб, скребки для зачистки тигля после слива металла и др.

Герметичный кожух вакуумной индукционной печи (рис. 3.47) представляет собой металлический замкнутый виток, охватывающий индуктор (исключение составляют печи с индуктором вне вакуумного пространства и немагнитическим кожухом). Увеличение диаметра кожуха с целью снижения потерь в нем связано с возрастанием вакуумируемого объема и необходимостью использования более мощной откачной системы, что нежелательно. Поэтому вакуумные печи даже небольшой емкости часто выполняют с магнитопроводом, что позволяет резко сократить потери в кожухе, не увеличивая его размеров. Для вакуумных печей удельные потери с поверхности пакетов магнитопровода не должны превышать  $525 \text{ Вт/м}^2$  при вакууме  $2,5 \text{ Па}$  и  $475 \text{ Вт/м}^2$  при  $0,15 \text{ Па}$ . Следует указать, однако, что магнитопровод усложняет конструкцию печи и снижает ее вакуумные свойства, так как стальные пакеты имеют развитые поверхности, которые адсорбируют газы.



Рис. 3.47. Фотография современной вакуумной ИТП

В зависимости от степени разрежения различают низковакуумные печи, работающие при давлении до 10 Па, средневакуумные – от 10 до  $10^{-2}$  Па и высоковакуумные, работающие при давлении ниже  $10^{-2}$  Па. Большая часть вакуумных индукционных тигельных печей относится к низко- и средневакуумным.

Система откачки печи состоит обычно из двух последовательно соединенных вакуумных насосов: механического, форвакуумного, позволяющего достигнуть давления 1 Па, и диффузионного, создающего более глубокое разрежение, но не могущего работать при выпускном давлении, превышающем 100–150 Па.

Для получения некоторых сплавов применяют так называемые вакуумно-компрессионные печи, которые могут работать как при пониженном, так и при повышенном давлении. Использование их целесообразно, например, при необходимости введения в сплав летучих компонентов. В этом случае плавку проводят в вакууме, а в конце процесса создают в печи повышенное давление инертного газа, после чего вводят летучие присадки.

Как уже было сказано выше (§ 3.8), в ИТП под действием электродинамических сил возникает циркуляция металла, а поверхность расплава приобретает выпуклую форму – образуется мениск (рис. 3.40 а). Форма поверхности расплава оказывает существенное влияние на энергетические и электрические характеристики установки с ИТП.

Электродинамическая циркуляция металла, которая может быть весьма интенсивной, является достоинством ИТП. Циркуляция ускоряет расплавление, выравнивает температуру и химический состав ванны, способствует взаимодействию металла со шлаком, однако приводит к ускоренному разрушению футеровки. Более подробно электродинамическая циркуляция в ИТП описана в § 3.8.

Основной тенденцией в развитии индукционных тигельных печей является рост как единичной емкости, так и суммарной емкости парка печей, связанный, прежде всего с потребностью в больших количествах высококачественного металла. Кроме того, при увеличении емкости повышается КПД печи и снижаются удельные расходы на ее изготовление и эксплуатацию.

### ***3.9.2. Индукционные каналные печи***

*Индукционные каналные печи (ИКП)* в основном используются для плавки цветных металлов (медь и сплавы на медной основе – латуни, бронзы, нейзильберы, мельхиоры, кундали; цинк; алюминий и их сплавы) и чугуна, а также в качестве миксеров для тех же металлов. Использование индукционных каналных печей для плавки стали ограничивается из-за недостаточной стойкости футеровки.

Наличие в индукционных каналных печах электродинамического и теплового движения расплавленного металла или сплава обеспечивает однородность химического состава и равномерность температуры расплавленного металла или сплава в ванне печи.

Индукционные каналные печи рекомендуется использовать в тех случаях, когда к выплавляемому металлу и полученным из него отливкам предъявляются высокие требования, в частности, по минимальным газонасыщенности и неметаллическим включениям.

Индукционные каналные миксеры предназначены для перегрева жидкого металла, выравнивания состава, создания постоянных температурных условий литья и в ряде случаев для дозирования и регулирования скорости литья в кристаллизаторы литейных машин или в литейные формы.

Шихта для индукционных каналных печей должна приготавливаться в соответствии с заданным составом выплавляемой марки металла или сплава, должна быть сухой и состоять в основном из первичного чистого металла.

Емкости современных ИКП находятся в диапазоне  $G = 0,5-250$  т, мощности –  $P = 150-6000$  кВт, частота  $f = 50$  Гц, электрический КПД –  $\eta = 0,9-0,95$ , коэффициент мощности –  $\cos\varphi = 0,6-0,8$ . Максимальная мощность одной индукционной единицы составляет 2000 кВт, число индукционных единиц – 1–6.

В настоящее время известен опыт некоторых зарубежных компаний (Германия) применения повышенной частоты (70–120 Гц) для питания ИКП. В этом случае преобразователь частоты играет роль преобразователя числа фаз, если число индукционных единиц не кратно 3.

К *основным достоинствам* индукционных каналных печей можно отнести следующие.

1. Минимальный угар (окисление) и испарение металла, так как нагрев происходит снизу. К наиболее нагретой части расплава, находящейся в каналах, нет доступа воздуха, а поверхность металла в ванне имеет сравнительно низкую температуру.

2. Малый расход энергии на расплавление, перегрев и выдержку металла. Канальная печь имеет высокий электрический КПД благодаря использованию замкнутого магнитопровода.

В то же время высок и тепловой КПД печи, так как основная масса расплава находится в ванне, имеющей толстую теплоизолирующую футеровку.

3. Однородность химического состава металла в ванне благодаря циркуляции расплава, обусловленной электродинамическими и тепловыми усилиями. Циркуляция способствует также ускорению процесса плавки.

К *основным недостаткам* индукционных каналных печей относятся следующие.

1. Тяжелые условия работы футеровки канала – подового камня. Стойкость этой футеровки снижается при повышении температуры расплава, при плавке сплавов, содержащих химически активные компоненты (например, бронзы, имеющие в своем составе олово и свинец). Затруднена плавка в этих печах также низкосортной, загрязненной шихты – вследствие зарастания каналов.

2. Необходимость постоянно (даже при длительных перерывах в работе) держать в печи сравнительно большое количество расплавленного металла. Полный слив металла ведет к резкому охлаждению футеровки каналов и к ее растрескиванию. По этой причине невозможен также быстрый переход с одной марки выплавляемого сплава на другую. В этом случае приходится проводить ряд балластных переходных плавов. Постепенной загрузкой новой шихты меняют состав сплава от исходного до требуемого.

3. Шлак на поверхности ванны имеет низкую температуру. Это затрудняет проведение нужных металлургических операций между металлом и шлаком. По этой же причине, а также ввиду малой циркуляции расплава вблизи поверхности затруднено расплавление стружки и легкого скрапа.

Принцип действия индукционной канальной печи подобен принципу действия силового трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания. Однако электрические параметры канальной электропечи и обычного трансформатора заметно отличаются. Это вызвано различием их конструкций. Конструктивно печь состоит (рис. 3.48) [21] из футерованной ванны 2, в которой помещается почти вся масса расплавляемого металла 3, и находящейся под ванной индукционной единицы.

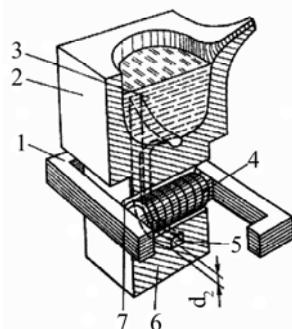


Рис. 3.48. Устройство индукционной канальной печи шахтного типа

Ванна сообщается с плавильным каналом 5, также заполненным расплавом. Расплав в канале и прилегающем участке ванны образует замкнутое проводящее кольцо.

Система индуктор – магнитопровод называется печным трансформатором. Футеровка, образующая плавильный канал, называется подовым камнем 6. Подовый камень представляет собой огнеупорный массив с цилиндрическим проемом 7, в который вставляется индуктор 4, навитый на стержень замкнутого магнитопровода 1.

Ток, протекающий во вторичной цепи, вызывает нагрев расплава, при этом почти вся энергия выделяется в канале, имеющем малое сечение (в канале поглощается 90–95% подведенной к печи электрической энергии). Металл нагревается за счет тепло- и массообмена между каналом и ванной. Индукционная единица объединяет печной трансформатор и подовый камень с каналом. Индуктор является первичной обмоткой трансформатора, а роль вторичного витка выполняет расплавленный металл, заполняющий канал и находящийся в нижней части ванны. Перемещение металла обусловлено главным образом электродинамическими усилиями, возникающими в канале, и в меньшей степени конвекцией, связанной перегревом металла в канале по отношению к ванне. Перегрев ограничивается некоторой допустимой величиной, лимитирующей допускаемую мощность в канале.

Принцип действия канальной печи требует постоянно замкнутой вторичной цепи. Поэтому допускается лишь частичный слив расплавленного металла и дозагрузка соответствующего количества новой шихты. Все каналные печи работают с остаточной емкостью, составляющей обычно 20–50% полной емкости печи и обеспечивающей постоянное заполнение канала жидким металлом. Замораживание металла в канале не допускается, во время межплавочного простоя металл в канале должен поддерживаться в расплавленном состоянии.

Индукционная канальная печь имеет следующие отличия от силовых трансформаторов:

1) вторичная обмотка совмещена с нагрузкой и имеет только один виток  $N_2$  с относительно малой высотой по сравнению с высотой первичной обмотки с числом витков  $N_1$  (рис. 3.49);

2) вторичный виток – канал – находится от индуктора на относительно большом расстоянии, так как отделен от него не только электрической, но и тепловой изоляцией (воздушным зазором и футеровкой). В связи с этим магнитные потоки рассеяния индуктора и канала значительно превышают потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток обычного силового трансформатора той же мощности, поэтому значения реактивных сопротивлений рассеяния индукционной канальной печи выше, чем у трансформатора. Это, в свою очередь, приводит к тому, что энергетические показатели индукционной канальной печи – это электрический коэффициент полезного действия и коэффициент мощности – заметно ниже, чем у обычного трансформатора.

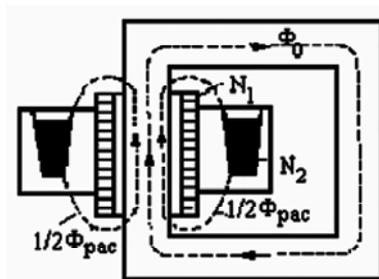


Рис. 3.49. Принципиальная схема ИКП

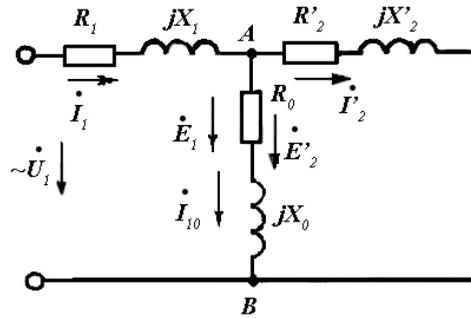
Основные уравнения (уравнение токов и уравнения электрического состояния) для индукционной канальной печи аналогичны уравнениям для трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания (отсутствует напряжение  $U_2$ ):

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (-\dot{I}'_2); \quad (3.79)$$

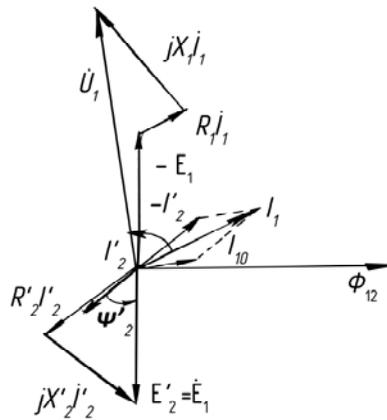
$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1; \quad (3.80)$$

$$\dot{E}'_2 = R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2. \quad (3.81)$$

Схема замещения и векторная диаграмма ИКП приведены на рис. 3.50 [21].



а



б

**Рис. 3.50. Схема замещения и векторная диаграмма:**

$U_1$  – напряжение на индукторе;  $I_1$  – ток в индукторе;

$I_{10}$  – ток холостого хода в индукторе;  $I'_2$  – приведенный ток в канале печи;

$E_1$  – ЭДС самоиндукции (наведенная основным потоком в обмотке индуктора);

$E'_2$  – ЭДС взаимоиндукции (наведенная основным потоком в канале печи);

$R_1, X_1$  – параметры индуктора;  $R'_2, X'_2$  – параметры канала;

$\psi'_2$  – потокосцепление, связывающее индуктор и канал

Интенсивное движение расплавленного металла из каналов в ванну и в обратном направлении имеет важнейшее значение, так как почти все тепло выделяется в каналах. В возникновении циркуляции металла некоторую роль играет конвекция, связанная с перегревом металла в каналах, но основным фактором является электродинамическое взаимодействие тока в канале с магнитным потоком рассеяния, проходящим между каналом и индуктором (рис. 3.51) [21].

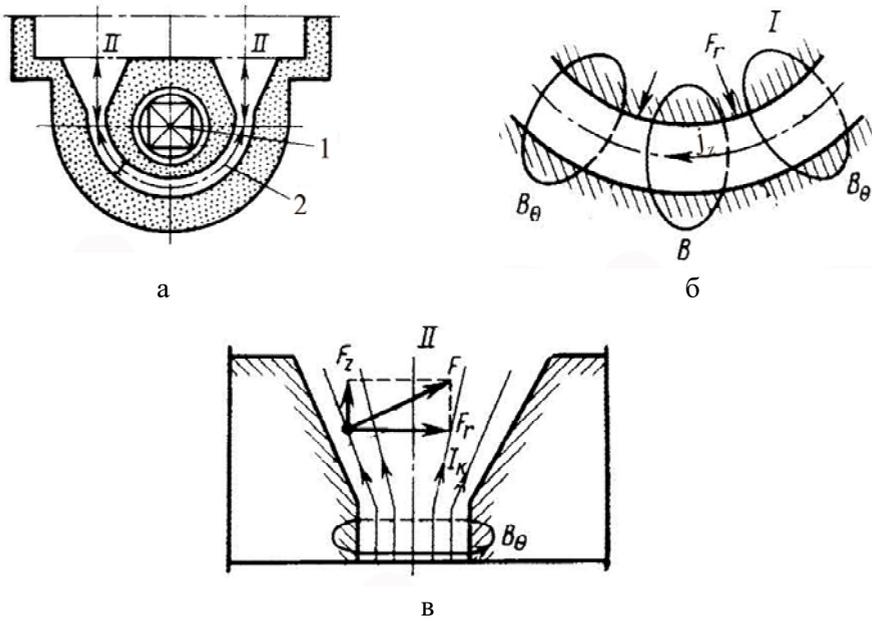


Рис. 3.51. Схема взаимодействия тока канала с магнитным полем

Электродинамические силы  $F_r$  направлены от индуктора 1 к металлу в канале 2 при осевом направлении плотности тока в канале  $j_z$ . Создаваемое ими давление равно нулю на внутренней поверхности канала и максимально на его наружной поверхности. Вследствие этого металл вытесняется в ванну из устья канала вдоль его наружной стенки и всасывается в канал вдоль его внутренней стенки (рис. 3.51 б). Для усиления циркуляции устьем каналом придают округлую форму, обеспечивающую минимальное гидравлическое сопротивление (рис. 3.51 а, в; 3.52).

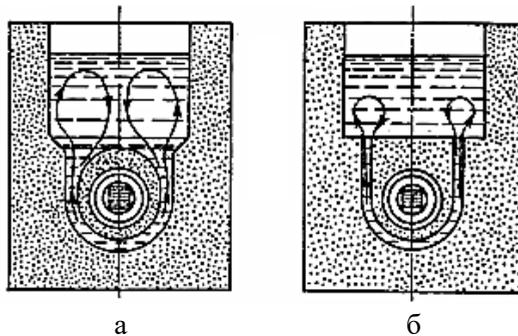
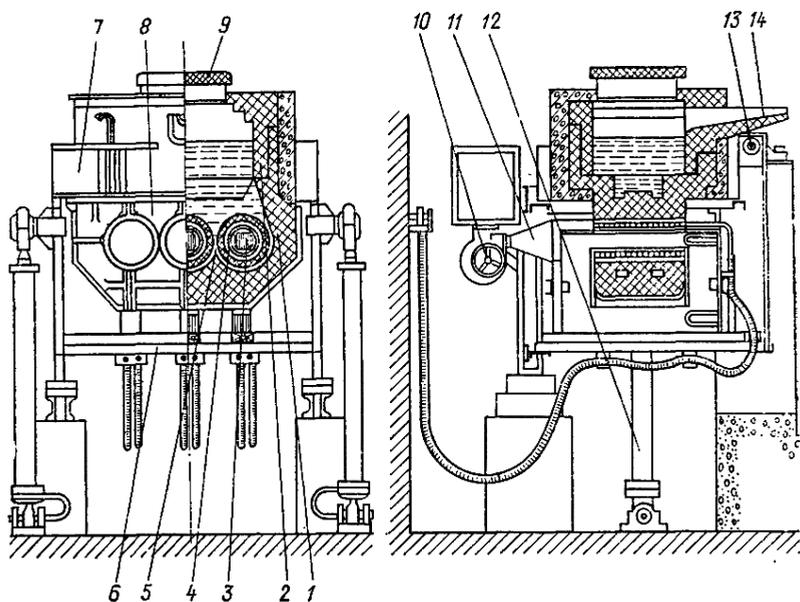


Рис. 3.52. Циркуляция металла в ИКП

В тех же случаях, когда необходимо ослабить циркуляцию (например, при плавке алюминия), устья делают без расширения, с большим гидравлическим сопротивлением.

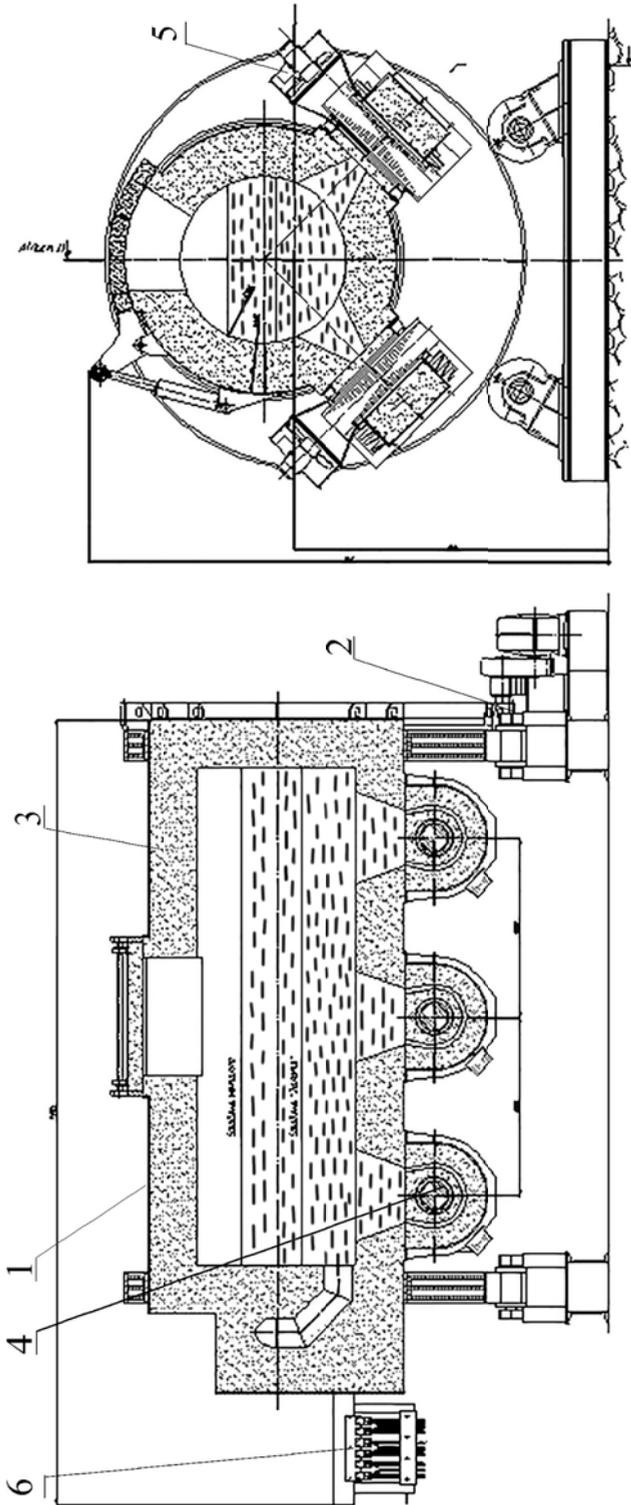
Сквозное однонаправленное движение металла через канал и ванну вместо симметричной циркуляции позволяет усилить тепло- и массообмен, уменьшить перегрев металла в каналах и за счет этого увеличить стойкость подового камня. Для обеспечения такого движения металла были предложены различные технические решения [3, 4]: винтовые канал с устьями, выходящими в ванну на разной высоте, что резко усиливает конвекцию; каналы переменного сечения, в которых имеется не только радиальная (обжимающая), но и осевая составляющая сил электродинамического взаимодействия тока в канале с собственным магнитным полем; дополнительный электромагнит для создания электродинамической силы, перемещающей металл вверх по центральному каналу сдвоенной индукционной единицы.

При большом разнообразии типов индукционных канальных печей основные конструктивные узлы являются общими для них всех: футеровка, трансформатор печи, корпус, вентиляционная установка, механизм наклона (рис. 3.53, 3.54).



**Рис. 3.53. Индукционная канальная печь для плавки медных сплавов с трехфазной индукционной единицей (шахтного типа):**

- 1 – подовый камень; 2 – футеровка ванны; 3 – магнитопровод;
- 4 – индукторы; 5 – каналы; 6 – каркас; 7 – кожух ванны;
- 8 – кожух индукционной единицы; 9 – крышка; 10 – вентилятор;
- 11 – воздуховод; 12 – гидравлические цилиндры;
- 13 – ось наклона; 14 – сливной носок



**Рис. 3.54. Индукционная канальная печь (барabanного типа):**

- 1 – кожух; 2 – механизм поворота; 3 – футеровка; 4 – индукционная единица;  
 5 – воздушное охлаждение футеровки канальной части;  
 6 – подвод тока и воды к индукторам

### **3.10. Индукционные нагревательные установки различного назначения**

Основными видами индукционных нагревательных установок является установки сквозного нагрева, поверхностной закалки, установки низкотемпературного индукционного нагрева (нагрев ферромагнитной стали), установки индукционного нагрева под сварку и пайку и др.

#### ***3.10.1. Индукционный сквозной нагрев***

Индукционный сквозной нагрев металлов нашел широкое применение в промышленности перед обработкой давлением, являющейся прогрессивным, малоотходным технологическим процессом. Кроме того, индукционный сквозной нагрев применяется в процессах термообработки металлов, к которым во многом применим изложенный ниже материал, и в низкотемпературных технологических процессах, которым посвящена следующая глава.

Горячая обработка металлов давлением: штамповка, ковка, прокатка, пресование, волочение, высадка, обкатка, прошивка и другие процессы характеризуются относительно малым износом инструмента (штампов, валков и т.п.), а также отсутствием наклепа заготовок по сравнению с обработкой давлением в холодном состоянии. Из этого условия выбираются температуры нагрева, которые различны для различных обрабатываемых металлов: стали, меди, алюминия, титана, их сплавов и т. д. (см. табл. 3.5 [22]).

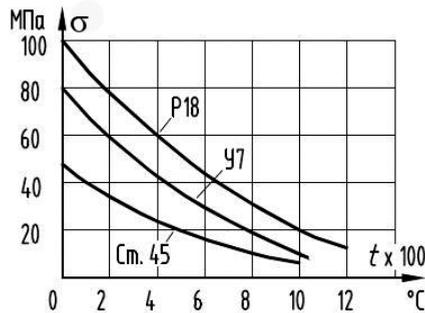
В данном параграфе в основном рассматривается нагрев стальных заготовок под ковку и объемную штамповку, а в других случаях, т.е. для других металлов или процессов, в тексте даются указания.

Одним из важнейших технологических требований является выбор температуры нагрева и необходимой равномерности нагрева заготовки. Наименьшее значение температуры нагрева выбирается из условия допустимой механической прочности стали при обработке давлением, равной  $\sigma = 5$  МПа. Это значение повышает ресурс работы рабочих органов кузнечно-прессового оборудования и резцов металлорежущих станков при дальнейшей обработке изделий, так как позволяет избежать упрочнения их поверхности, а также снижает брак за счет образования микротрещин.

Для различных марок стали зависимости прочности от температуры различны, из рис. 3.55 следует, что температура нагрева перед ковкой (наименьшее значение) должна быть для стали 45–1100°C, для стали У7–1200°C и для стали Р18 – 1300 °C [22].

**Свойства металлов и сплавов, нагреваемых в индукционных установках  
под обработку давлением**

Металл, сплав	Температура нагрева, °С	Удельное электрическое сопротивление, Ом · м	Удельная теплоемкость средняя, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
Сталь 45	1150–1250	$1,2 \cdot 10^{-6}$ при 1200 °С	662	27 при 1200 °С
Сталь 12Х18Н9Т	1150–1200	$1,24 \cdot 10^{-6}$ при 1200 °С	575	29 при 900 °С
Сплавы титана	950–1100	$1,7-1,8 \cdot 10^{-6}$ при 1100 °С	685	22–28 при 1000 °С
Медь и ее сплавы	600–850	$8,0 \cdot 10^{-8}$ – $16,3 \cdot 10^{-8}$ при 850 °С	450	120–350 при 700 °С
Алюминий и его сплавы	350–500	$1,00 \cdot 10^{-7}$ – $1,40 \cdot 10^{-7}$ при 500 °С	1000	170–230 при 450 °С
Цинк	150	$1,800 \cdot 10^{-7}$ при 300 °С	396 при 100 °С	110 при 150 °С
Молибден	600–1200	$3,8 \cdot 10^{-7}$ при 1200 °С	324 при 1200 °С	95 при 1200 °С
Вольфрам	700–1300	3,9 при 1200 °С	156 при 1200 °С	109 при 1200 °С



**Рис. 3.55. Зависимости прочности разных марок сталей от температуры**

При повышении температуры нагрева начинается укрупнение зерен стали, что приводит к снижению ее прочностных характеристик (см. рис. 3.56), т.е. к браку. Этот вид брака может быть устранен дополнительной термообработкой – рекристаллизационным отжигом, т.е. нагревом до температуры рекристаллизации, при которой зерно стали становится мельче (см. рис. 3.56). Однако при значительных перегревах заготовок возникает пережог – окисление стали по границам зерен, который является неустранимым видом брака, и заготовка идет на пе-

реплав. Следует учесть, что перегрев заготовок требует и повышенного расхода электроэнергии. Следует отметить, что потери металла на окалину обычно не превышает 0,5%, т.е. существенно ниже, чем в пламенных печах (2–4%).

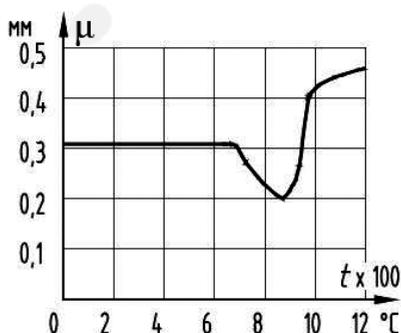


Рис. 3.56. Зависимость радиуса зерна стали от температуры

При обработке давлением требуется высокая равномерность нагрева заготовки по сечению, что трудно обеспечить при индукционном нагреве даже с учетом его глубинного характера. На рисунке 3.57 показаны варианты распределения температуры по сечению цилиндрической заготовки. Без учета потерь с поверхности температура снижается резко при поверхностном нагреве (1) и менее резко в пределах слоя, равного глубине проникновения электромагнитной волны, при глубинном нагреве (2). С учетом тепловых потерь с поверхности (кривая 3) максимум температуры находится на некотором расстоянии от поверхности и будет тем сильнее выражен, чем меньше значение теплопроводности металла. При определении допустимого перепада температур по сечению заготовки следует учитывать время ее транспортировки к прессу (ковочной машине), в ходе которого температура выравнивается. Обычно допустимый перепад температуры оценивается значением  $\Delta t = 50 - 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

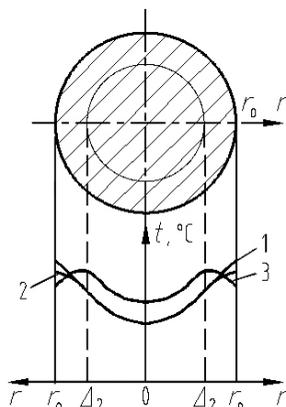


Рис. 3.57. Распределение температуры по сечению цилиндрической заготовки при индукционном нагреве

Наличие перепада температуры по сечению заготовки приводит к возникновению термических усилий в ней, которые могут привести к образованию трещин. По оценкам, данным в [23], возникающие температурные напряжения близки к допустимому пределу хрупкой прочности, равному для среднеуглеродистых сталей  $1,15 \cdot 10^3$  МПа, при перепаде температуры 200 °С.

Различают два типа индукционного сквозного нагрева: нагрев с постоянной удельной поверхностной мощностью  $p_0 = \text{const}$  (обычный нагрев) и нагрев с постоянной температурой поверхности  $t_n = \text{const}$  (ускоренный изотермический нагрев) (см. рис. 3.58). Ускоренный нагрев ведется в два этапа: первый – нагрев с максимальным допустимым значением удельной поверхностной мощности до достижения требуемой температуры поверхности и второй – нагрев с регулированием удельной поверхностной мощности для поддержания постоянного значения температуры поверхности заготовки до достижения требуемой температуры центра. Время первого этапа обычно составляет менее 15% времени нагрева. Применение ускоренного нагрева дает выигрыш во времени в 2–2,5 раза по сравнению с обычным нагревом. Однако при ускоренном нагреве, как это видно из рис. 3.58, возникают большие температурные перепады между поверхностью и центрами, следовательно, большие температурные напряжения.

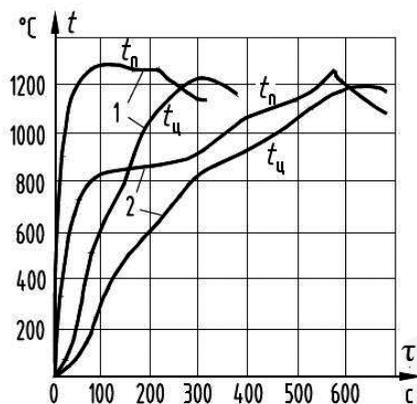


Рис. 3.58. Зависимости температур поверхности и центра заготовки от времени нагрева при ускоренном (1) и обычном (2) нагреве

При обычном нагреве скорость повышения температуры поверхности после перехода температуры потери ферромагнитных свойств замедляется, так как растет глубина проникновения, т.е. слой, в котором преобразуется в теплоту электромагнитная энергия. Укажем также, что при нагреве ферромагнитных сталей наблюдаются тепловые эффекты фазового перлитно-аустенитного и магнитного превращений. Однако энергии их – 49,35 и 52,08 Дж/г соответственно – незначительны по сравнению с энергией электромагнитного поля и поэтому в балансе энергий процесса индукционного нагрева не учитываются.

Процесс обработки давлением сопровождается также выделением теплоты. Поэтому в некоторых случаях для обеспечения требуемого качества изделия нагрев заготовок по их длине осуществляется неравномерным, например, при производстве труб или кабельных оболочек из алюминия. Такой нагрев называют градиентным. Тот конец заготовки, с которого начинается обработка давлением, нагревают до более высокой температуры, чем остальная заготовка, разогреваемая за счет преобразования механической энергии деформации металла в теплоту.

Перспективным является применение индукционного сквозного нагрева прямоугольных слябов в прокатном производстве. Размеры слябов могут достигать в сечении  $2,0 \times 0,5$  м и по длине до 8,0 м. Такие установки имеют мощности в десятки мегаватт, а основной проблемой их создания является задача формирования в слябе требуемого по технологии распределения температуры по всем координатам.

К основным параметрам установок индукционного сквозного нагрева относятся полезная мощность, установленная мощность, электрический и тепловой КПД, время нагрева, частота тока индуктора, режим работы, тип источника питания, тип привода механизмов, тип системы управления, конфигурация индуктора и магнитопровода, а также их геометрические размеры и материал, футеровка.

Полезная мощность индукционного нагревателя определяется по соотношению

$$P_{\text{пол}} = \frac{c \cdot (t_n - t_0) \cdot G}{\tau_n}, \quad (3.82)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость (среднее значение),  $t_0$  и  $t_n$  – температуры начальная и конечная,  $G$  – масса заготовки,  $\tau_n$  – время нагрева.

Установленная мощность предварительно находится по формуле

$$P_{\text{уст}} = k \cdot \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{т}}}, \quad (3.83)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий потери в источнике питания, конденсаторной батарее и токопроводах ( $k = 1,3-1,5$ );  $\eta_{\text{э}}$  – электрический КПД индуктора и  $\eta_{\text{т}}$  – тепловой КПД. Затем по этому значению и частоте выбирается источник питания, мощность которого и определяет установленную мощность индукционного нагревателя.

Удельная поверхностная мощность равна

$$p_0 = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_{\text{т}} \cdot S}, \quad (3.84)$$

где  $S$  – энергоспринимающая поверхность загрузки.

Обычно при нагреве с постоянной удельной поверхностной мощностью ее значение не превышает  $1000 \text{ кВт/м}^2$ .

Значения электрического и теплового КПД равны соответственно при нагреве стальной загрузки 0,7–0,9 и 0,8–0,9. При нагреве меди и алюминия электрический КПД снижается до 0,4–0,6.

Определение времени нагрева выполняется путем решения уравнения нестационарной теплопроводности для загрузки с учетом внутренних источников теплоты. Приблизительно время нагрева для цилиндрических стальных заготовок может быть определено по формуле

$$\tau_n = k \cdot d_{2np}^2, \quad (3.85)$$

в которой  $k$  – коэффициент, зависящий от конечного температурного перепада между поверхностью и центром и вида нагрева:

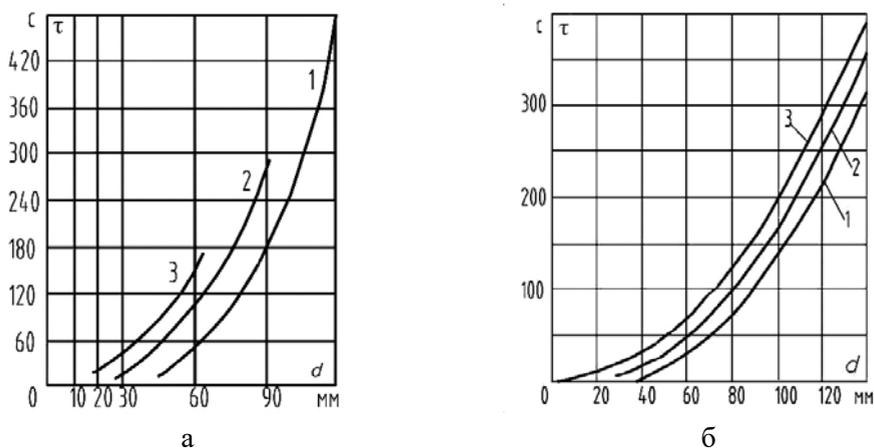
Перепад температуры, °С	Коэффициент $k$ при нагреве	
	обычном	ускоренном
100	5,9	2,5
150	3,7	1,8

Приведенный диаметр заготовки  $d_{2np}$  определяется как

$$d_{2np} = d_2 - \xi, \quad (3.86)$$

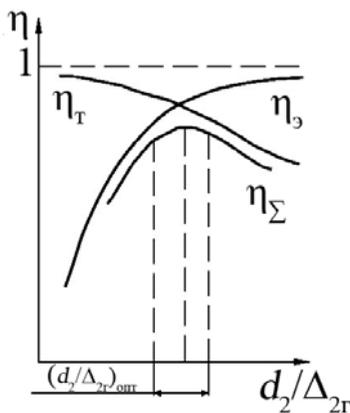
где  $\xi$  – толщина слоя, в котором выделяется большая часть энергии:  $\xi = \Delta_{2r}$  при  $d_2 > 5 \cdot \Delta_{2r}$ ;  $\xi = 0,2 \cdot d_2$  при  $d_2 < 5 \cdot \Delta_{2r}$  ( $\Delta_{2r}$  – «горячая» (соответствующая температуре нагрева  $t_n$ ) глубина проникновения электромагнитной волны в материал загрузки).

На рисунке 3.59 а, б приведены графические зависимости времени нагрева цилиндрических заготовок при обычном и ускоренном нагреве и значении конечного перепада температур  $\Delta t = 100$  °С.



**Рис. 3.59.** Время нагрева стальных цилиндрических заготовок в зависимости от их диаметра при обычном (а) и ускоренном (б) нагреве при частоте 1000 (1), 2400 (2) и 8000 (3) Гц

Одним из основных параметров является частота тока индуктора. Выбор частоты осуществляется с учетом получения максимального полного КПД и минимальной стоимости установки. Полный КПД индуктора, равный  $\eta_{\Sigma} = \eta_3 \cdot \eta_r$ , зависит от отношения  $d_2 / \Delta_{2r}$ , т.е. от частоты. С увеличением частоты  $\eta_3$  возрастает, а  $\eta_r$  снижается, так как при этом уменьшается глубина проникновения, а время нагрева и тепловые потери увеличиваются. Зависимости  $\eta_{\Sigma}$ ,  $\eta_3$  и  $\eta_r$  от отношения диаметра заготовки к «горячей» глубине проникновения приведены на рис. 3.60. Наибольшие значения полного КПД достигаются при оптимальных значениях  $d_2 / \Delta_{2r}$ , равных 3,5–6,0 для различных материалов. Так как на практике имеются определенные значения частот, на которые промышленность выпускает источники питания и другое электрооборудование, то сформулированы рекомендации по выбору частоты (см. табл. 3.6). В рекомендациях учтены также капитальные затраты, т.е. стоимость электрооборудования.



**Рис. 3.60.** Зависимости полного, электрического и теплового КПД от отношения диаметра заготовки к глубине проникновения

При нагреве ферромагнитных стальных заготовок значение оптимальной частоты будет различным для «холодного» и «горячего» режимов, т.е. до и после потери ферромагнитных свойств. В связи с этим целесообразно в некоторых случаях использовать двухчастотный нагрев: до точки Кюри вести нагрев на промышленной частоте, а затем использовать среднюю частоту (500 Гц и более). При этом снижается установленная мощность преобразователей частоты и уменьшаются капитальные затраты, однако увеличивается номенклатура запасного оборудования и возрастают трудности эксплуатации (наладка и обслуживание оборудования). Двухчастотный нагрев используют для заготовок диаметром 60 – 200 мм.

При нагреве заготовок квадратного сечения также можно пользоваться рекомендациями табл. 3.6.

Таблица 3.6

**Рекомендуемые частоты для сквозного нагрева  
в зависимости от материала и диаметра загрузки**

Частота, Гц	Диаметр загрузки, мм			
	Сталь конструкционная	Титановые сплавы	Медные сплавы	Алюминиевые сплавы
50	> 200	> 220	> 100 (> 60)	> 120 (> 70)
500	90–220	100–240	40–130	30–120
1000	60–150	70–180	25–100	20–85
2400	40–100	40–100	15–30	12–25
8000	20–70	20–80	10–18	8–15
Радиочастота	< 30	< 30	< 12	< 10

Примечание: для 50 Гц в скобках указаны значения диаметров для чистых меди и алюминия.

При выборе частоты для нагрева труб пользуются формулой

$$f = (4 - 10) \cdot 10^5 \cdot \rho_2 / (d_2 \cdot \delta_2), \quad (3.87)$$

где  $\delta_2$  – толщина стенки трубы.

Следует сказать, что все рекомендации по выбору частоты даны для относительно длинных заготовок, т.е. длина заготовки должна превышать ее диаметр  $l_2 > d_2$ .

Установки индукционного сквозного нагрева работают в режимах периодическом или непрерывном. При периодическом режиме цикл работы установки включает в себя загрузку, нагрев и выгрузку, при этом различают основное и вспомогательное время. С целью повышения производительности применяют непрерывный режим работы. В этом случае в индукторе находятся несколько нагреваемых заготовок, при этом через определенный промежуток времени в индуктор вместо уже нагретой заготовки подаётся холодная и, следовательно, температуры всех заготовок различны. Если заготовки имеют большую длину, то реализация непрерывного нагрева затруднительна. Преимуществом установок непрерывного нагрева является небольшое изменение потребляемой мощности в процессе работы, так как параметры загрузки в этом случае меняются мало.

Выбор геометрических размеров индуктора рассмотрим на примере установки для нагрева стальных цилиндрических заготовок диаметром до 200 мм под ковку. К основным размерам относятся длина и внутренний диаметр индуктора (или зазор между индуктором и заготовкой).

Для обеспечения равномерного нагрева длина индуктора должна превышать длину заготовки или нескольких заготовок, находящихся в индукторе. Обычно предлагается соотношение

$$l_1 = l_2 + d_1, \quad (3.88)$$

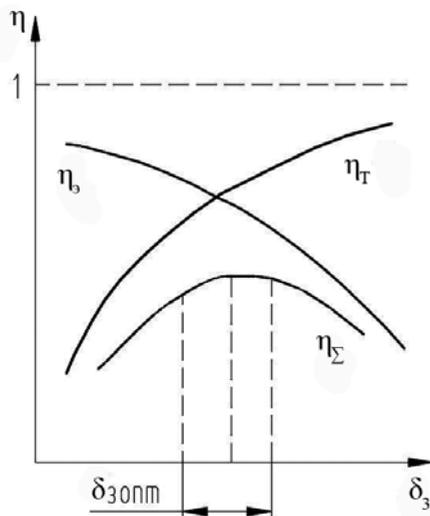
где  $d_1$  – внутренний диаметр индуктора.

Значение  $d_1$  выбирается из условия наибольшего полного КПД индуктора, зависящего от зазора  $\delta_3$ , который входит в формулу

$$d_1 = d_2 + 2 \cdot \delta_3. \quad (3.89)$$

Так как электрический КПД индуктора возрастает при уменьшении зазора, а тепловой КПД при этом снижается, то имеются при данном типе материала футеровки оптимальные значения зазора, что видно из рис. 3.61. Рекомендуемые значения  $\delta_3$  в зависимости от диаметра стальной заготовки  $d_2$  приведены ниже:

Показатель	Интервалы значений			
$d_2$ , мм	менее 50	50–125	130–170	свыше 170
$\delta_3$ , мм	10–15	15–20	25–35	35–40



**Рис. 3.61.** Зависимости полного, электрического и теплового КПД от зазора между индуктором и заготовкой

Для других металлов принимаются значения  $\delta_3$ , отличающиеся от приведенных в большую или меньшую сторону в зависимости от температуры нагрева.

Выбор материала индуктора и его конструктивных особенностей рассмотрен в разделе 3.6.2 и 3.7.2.

Для повышения энергетических характеристик и защиты стальных элементов конструкции нагревателя от нагрева из-за магнитных потоков рассеивания в установках промышленной частоты практически всегда, а на частоте 500 Гц иногда, применяют магнитопроводы. Форма магнитопровода (обычно пакеты прямоугольного сечения) зависит от формы индуктора и других факторов, например, необходимости обеспечения заданной конфигурации электромагнитного поля.

Выбор источника питания производится исходя из значения частоты и технологических требований к режиму работы установки. Установки промышленной частоты питаются от сети с использованием регулирующего трансформатора. На промышленной частоте применяют так называемые вольтодобавочные трансформаторы, включаемые последовательно с индуктором и позволяющие в некоторых пределах регулировать напряжение как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Используются также и тиристорные регуляторы-выключатели, однако они создают искажение напряжения сети.

Установки средней частоты питаются от статических преобразователей частоты (тиристорные или транзисторные инверторы).

Выбор конфигурации индуктора связан не только с формой и габаритами заготовки, но и с разработкой оптимальной компоновки нагревателя для обеспечения наименьших массо-габаритных показателей, наилучшей кинематической схемы подачи заготовок, удобства эксплуатации и т.п. На рисунке 3.62 показаны некоторые варианты выполнения индуктора. Стрелками указаны направления перемещения заготовок.

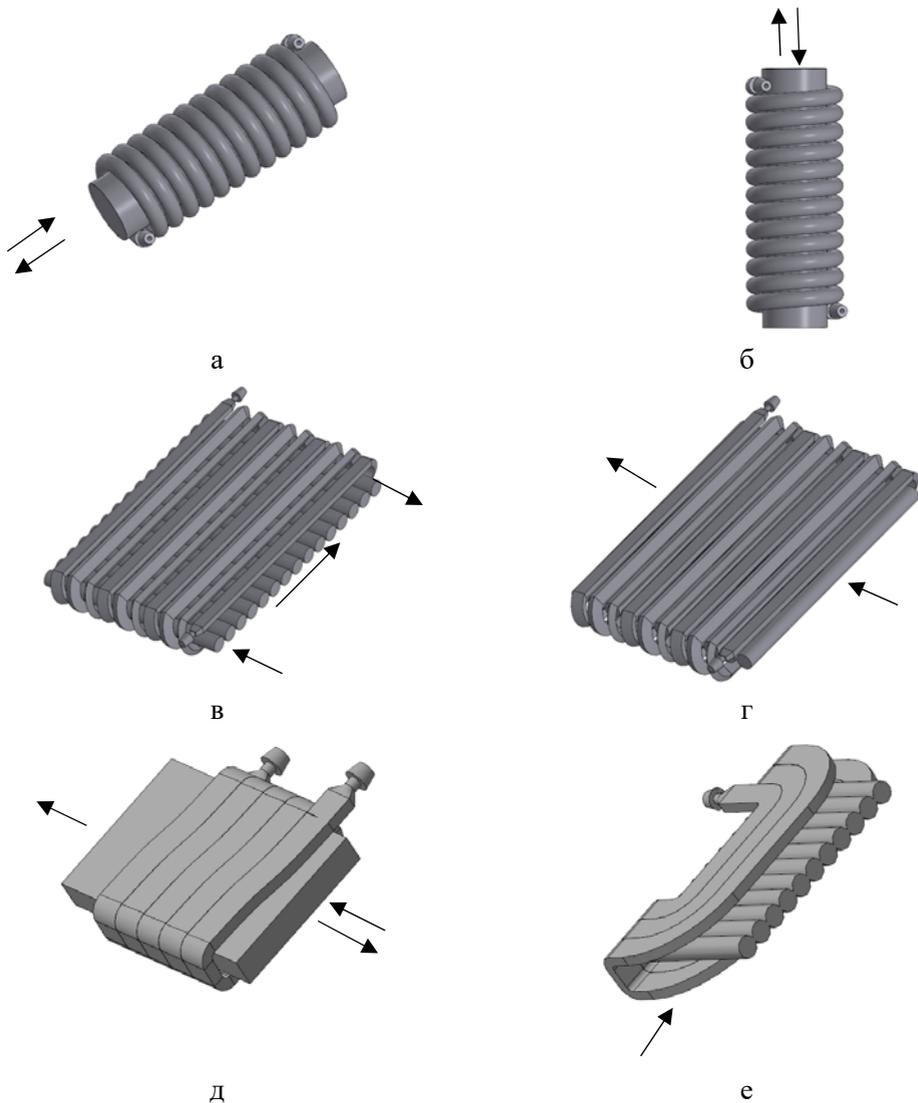
По схеме рисунка 3.62 а нагреватель может работать в периодическом или непрерывном режиме. С увеличением массы заготовки возникает задача обеспечения надежной транспортировки ее через индуктор, для чего используются направляющие или ролики. Заготовки могут выгружаться с любой стороны.

На рисунке 3.62 б показан нагреватель крупногабаритных заготовок с вертикально установленным индуктором. Заготовка подается снизу и опускается после нагрева подъемником.

Нагреватели непрерывного действия для нагрева цилиндрических заготовок в продольном и поперечном поле показаны на рис. 3.62 в, г. Заготовки в индукторе перекачиваются, что обеспечивает равномерность нагрева. Эти нагреватели отличаются малыми габаритами.

Прямоугольные слябы нагреваются в индукторе соответствующей формы (рис. 3.62 д). Одна из проблем при этом – перегрев углов сляба. Для обеспечения равномерности нагрева усложняют форму индуктора, а также используют магнитопроводы.

Нагрев концов заготовок может осуществляться в индукторе щелевого типа, см. рис. 3.62 е. Для расчета нагрева заготовок эта схема близка к схеме нагревателя рис. 3.62 г, так как надо учитывать переменное значение зазора. Однако пути индуцированного тока в загрузке различны.



**Рис. 3.62. Схемы устройств индукционного сквозного нагрева:**  
 цилиндрический индуктор с горизонтальным (а)  
 и вертикальным (б) расположением оси, овальный индуктор с продольным (в)  
 и поперечным (г) расположением загрузки, индуктор для нагрева слябов (д), щелевой индуктор для  
 нагрева концов заготовок (е)

Приведенные варианты устройств не исчерпывают всех применяемых конструктивных схем.

В качестве привода в установках сквозного нагрева применяются электро-механические толкатели, пневмо- и гидроцилиндры. Обычно гидропривод применяется при большой массе загрузки и реализуется в виде толкателей или подъ-

емников. Электромеханические толкатели имеют малый ход штока (до 50 мм) и применяются для подачи в индуктор коротких заготовок. Однако разработки дискретного электропривода на базе линейных шаговых двигателей существенно расширили области применения электромеханических толкателей. В промышленности широко распространены пневмоприводы, обеспечивающие надежную работу при хороших эксплуатационных характеристиках.

Для управления установками индукционного сквозного нагрева используются различные автоматические регуляторы с использованием различных элементных баз: релейные, на основе логических элементов, микропроцессорные. При управлении решаются задачи обеспечения качества нагрева при нормальном режиме работы, каких-либо отклонениях, например, изменении напряжения сети, а также в аварийных ситуациях. Выбор типа системы управления определяется многими факторами, в том числе стоимостью продукции, требованиями к работе линии или участка, в состав которых входит установка, и т.д.

При создании индукционных нагревателей для прокатного производства возникает задача обеспечения равномерности нагрева слябов, т.е. крупногабаритных заготовок прямоугольного сечения. Равномерность нагрева может быть достигнута путем использования различных методов создания электромагнитного поля определенной конфигурации, а также воздействия на тепловые потери с различных участков поверхности сляба. Наиболее широко применяют следующие методы обеспечения требуемого качества нагрева: специальная конфигурация индуктора; использование нескольких различных индукторов, в том числе торцевых; питание индукторов токами различных частот; использование специальных конфигураций магнитопроводов; установка электромагнитных экранов; неравномерная толщина футеровки по поверхности сляба; расположение сляба в индукторе, например, заглубление; многостадийный нагрев сляба в различных индукторах.

### ***3.10.2. Низкотемпературный индукционный нагрев стали***

#### ***3.10.2.1. Низкотемпературные технологические процессы***

В различных отраслях народного хозяйства получили широкое распространение низкотемпературные (до 700 °С) технологические процессы с применением индукционного нагрева ферромагнитной стали (ИНФС) на промышленной частоте. Рассмотрим основные процессы низкотемпературного нагрева.

#### **Машиностроение и металлургия**

В технологии осуществления и разработки неподвижных посадок используется нагрев деталей с отверстием до температур 150–450°С. При этом предъявляются требования высокой равномерности нагрева во избежание коробления детали при большой скорости нагрева для повышения производительности и снижения тепловых потерь. Например, при монтаже и демонтаже турбогенерато-

ров нагревают бандажные кольца роторов большого диаметра 300–1000 мм. Температуры нагрева 250–450°C, время нагрева – не более 25 мин. Известны устройства для нагрева под посадку крупных храповых колес, конических шестерен, больших блоков. Для снятия напрессованных деталей их нагревают, а затем используют механизмы, например, винтовые, позволяющие осуществить разборку соединения.

Для повышения пластичности закаленных деталей и снятия остаточных напряжений применяется их отпуск, для чего изделия нагреваются до температур порядка 600°C, а иногда и выше, в зависимости от марки стали. Нагрев под термообработку с использованием частоты 50 Гц позволяет прогревать закаленный при поверхностной закалке слой, а также достичь высокой скорости обработки. Термообработка с использованием индукционного нагрева применяется и для снятия напряжений после механической обработки. Это так называемый рекристаллизационный отжиг стальной ленты в рулонах и проволоки в бунтах.

При горячей обработке металла давлением для снижения брака целесообразно подогреть штампы, пресс-формы и другие инструменты. Одновременно с качеством изделий повышается стойкость инструмента благодаря снижению термических напряжений в нем. При прессовании алюминиевых и титановых сплавов температура нагрева инструмента составляет 250–450°C. Используются различные конструктивные схемы индукционного нагрева на промышленной частоте.

При обработке стальных заготовок давлением применяется индукционный нагрев стали при температуре до точки Кюри с использованием тока промышленной частоты. Это либо первый этап нагрева с последующим нагревом до более высоких температур, либо нагрев до 450–650°C для обработки давлением в полугорячем состоянии.

Для повышения производительности оборудования при резании стальных заготовок и увеличения срока службы резцов заготовки могут нагреваться в индукторе, что приводит к снижению их прочности. Индуктор при этом устанавливается рядом с суппортом токарного станка.

При цинковании методом окунания детали в расплавленный цинк обогрев стального корпуса цинковальной ванны (температура расплава около 460°C) целесообразно осуществлять индукционным методом на промышленной частоте.

Цинковальная ванна представляет собой устройство косвенного индукционного нагрева, т.е. стенка ванны играет роль промежуточного нагревателя. Подобные устройства используются также для сушки лакокрасочных покрытий и электроизоляции и представляют собой стальные камеры, нагреваемые в электромагнитном поле индуктора. В некоторых случаях применяют непосредственный индукционный нагрев окрашенного стального изделия.

## **Химическая промышленность**

В ней широко применяются реакторы и аппараты для проведения технологических процессов обработки реакционных масс, полимеризации, сушки, возгонки и т.п. при температурах 50–600°C. Обычно при этом используются удельные поверхностные мощности не более 100 кВт/м<sup>2</sup>, что позволяет эффективно применять индукционный нагрев. Для повышения антикоррозийной устойчивости корпус реактора может быть изготовлен двухслойным: снаружи ферромагнитная конструкционная сталь и внутри слой из нержавеющей стали. Ориентировочные характеристики реакторов и аппаратов: рабочий объем 0,1–32 м<sup>3</sup>, мощности 10–1600 кВт, электрический КПД 0,9 и выше, коэффициент мощности 0,65–0,85.

В различных химических процессах применяются индукционные нагреватели жидкостей и газов. Это устройства косвенного нагрева, причем технологи задают температуру и расход газа или жидкости, а разработчик получает возможность сам определять конструктивную схему устройства и материал элементов конструкции. Целесообразно в таких случаях использовать конструкции, аналогичные силовым трансформаторам для достижения наилучших энергетических показателей.

В производстве пластмассовых изделий необходимо обогревать прессформы, штампы и экструдеры. Температуры обогрева обычно ниже 200°C. Мощности таких устройств обычно не превышают 100 кВт при включении на сетевое напряжение 220/380 В. Как и в других случаях, индукционный нагрев отличается помимо хороших энергетических показателей еще и высокой надежностью.

Такая характеристика индукционного нагрева, как бесконтактность передачи энергии, эффективно используется при нагреве вращающихся валков, каландров и натяжных роликов, применяемых в химической промышленности. Габариты этих элементов, требуемые температуры и мощности устройств могут изменяться в широких пределах.

Разнообразные конструктивные решения устройств индукционного нагрева ферромагнитной стали, применяемых в химии, приведены ниже.

## **Строительство и монтаж**

Для ускорения твердения бетонных и железобетонных изделий применяется их термообработка при температуре 70–90°C. С помощью индукционного нагрева нагревается стальная форма или арматура, от которых теплота передается бетону. В результате повышается производительность, улучшается качество изделий, уменьшаются площади в цехе под проведение данного процесса. Обычный цикл: нагрев и выдержка по 3–4 часа, охлаждение 3 часа. Обрабатываются самые различные изделия: трубы большого диаметра, балки, панели, опоры линий электропередач и др. Расход электроэнергии 60–120 кВт·ч/т. Мощность установки до 1000 кВт. Известны конструкции универсальных камер термообра-

ботки бетонных изделий, представляющие собой устройства со стальными сварными камерами и применением косвенного индукционного нагрева на промышленной частоте.

Индукционный способ нагрева позволяет улучшить качество сушки древесины и повысить производительность по сравнению с использованием других методов нагрева. При этом нагреваются специальные ферромагнитные тепловыделяющие элементы, закладываемые в штабель древесины. Сушка осуществляется при температуре 85–120°C в течение 24–72 ч в зависимости от сорта древесины, толщины пиломатериалов, начальной влажности, способа укладки древесины, организации вентиляции и других факторов. Расход электроэнергии 150–250 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> пиломатериала. Штабель древесины размещается на тележке, которая по рельсам въезжает в камеру сушки (индуктор).

Другими применениями устройств индукционного нагрева ферромагнитной стали на промышленной частоте являются варка битума (180–200°C), сушка асбеста, обогрев желобов для подачи раствора, разрушение железобетонных изделий за счет термического расширения стальной арматуры.

При монтажных работах, например, монтаж трубопроводов, декомпозиеров и других крупногабаритных стальных емкостей, широко применяется электрическая дуговая сварка. После сварки возможно появление трещин, проходящих по шву или в околошовной зоне (особенно при проведении работ в зимнее время года). Подобные явления возникают и при сварке при обычной температуре массивных деталей (валов большого диаметра, толстостенных труб). Для получения высокого качества сварного шва в этих случаях применяется предварительный подогрев перед сваркой и термообработка сварного шва и околошовной зоны. Температура предварительного нагрева составляет 120–450°C, при этом лимитируется скорость нагрева 15–60°C/ч. Применяемая после сварки термообработка – отпуск – заключается в нагреве до 450–600°C, иногда несколько выше, выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении.

### **Транспорт**

В зимнее время при транспортировке сыпучих материалов (уголь, руды, щебень, песок и т.п.) в контейнерах и железнодорожных вагонах различного типа возникает проблема их выгрузки вследствие примерзания к стенкам емкости и смерзания. Одним из методов разрушения сцепления примерзшего угля со стенкой является индукционный нагрев. Обычно при ИНФС используются удельные поверхностные мощности в интервале 10–30 кВт/м<sup>2</sup>, а необходимая температура около 0°C. Весьма эффективной является комбинация нагрева и вибрации, благодаря чему экономится электроэнергия. Вибрация может быть получена при импульсном нагреве, для чего питание индукторов осуществляется от тиристорных регуляторов. Имеется некоторый опыт использования устройств ИНФС для разгрузки контейнеров и железнодорожных вагонов в России, а также в Германии и Швеции.

Борьба с примерзанием и смерзаемостью сыпучих материалов ведется также и в других видах оборудования, к которым относятся бункера, желоба, тетки.

Для обогрева железнодорожных стрелок также эффективно применение индукционного нагрева. Обогреваются два рельса длиной 5 м. Используется низкое напряжение (несколько вольт), мощность 2 кВт.

При транспортировании по трубопроводам вязких и застывающих жидкостей (смазки, жиры, химикаты, нефть, битум, асфальт и др.), а также газообразных веществ с высокой температурой конденсации (бутан, пропан) необходим обогрев трубопровода для поддержания определенной температуры. Например, для бутана и пропана нужна температура трубопровода выше 15 °С, а для битума – 180–200 °С.

### **Сельское хозяйство, быт и другие применения**

Для обогрева теплиц, парников, животноводческих помещений и т.д. могут быть использованы индукционные нагревательные устройства. Наиболее широко применяются устройства, выполненные в виде стальной трубы с расположенным внутри ее штыревым индуктором. Такие устройства имеют очень высокий КПД (практически 1) и коэффициент мощности около 0,85.

В быту и в сельском хозяйстве применяются индукционные водонагреватели. Различают два варианта водонагревателей: котлы-накопители, которые могут обогреваться ночью, и быстродействующие проточные, имеющие большую мощность и обеспечивающие подачу горячей воды через 60–90 с после включения.

Разработаны конструкции бытовых электроплит с индукционным нагревом на промышленной частоте. Преимуществом их по сравнению с другими типами является бесконтактность нагрева. Некоторым недостатком является необходимость использования специальных кастрюль и сковород.

В других отраслях нашли применение индукционные вулканизаторы для ремонта гибких кабелей в условиях взрывоопасных помещений (в шахтах), в технологии пайки, для сушки и прокалики обмазки сварочных электродов, в процессах гибки и резки стальных прутков в заготовительных цехах, нагрева вращающихся барабанов и каландров в текстильной и бумагоделательной промышленности и т.д.

### *3.10.2.2. Характеристики и конструкции устройств ИНФС*

В связи с многообразием технологических процессов и широким диапазоном значений мощностей установок (от единиц до нескольких киловатт) конструкции установок ИНФС весьма разнообразны. Для достижения наилучших энергетических, эксплуатационных и стоимостных показателей в установках ИНФС используются различные типы систем индуктор–загрузка (рис. 3.10).

Практика показала, что в конкретных технологических установках целесообразно использовать тот или иной тип системы индуктор – загрузка. Например, надо учитывать форму загрузки, необходимое значение удельной поверхностной мощности и температуру нагрева. В таблице 3.7 приведены некоторые технико-экономические характеристики, присущие установкам с использованием данных типов систем индуктор – загрузка.

Таблица 3.7

**Энергетические характеристики различных типов устройств ИНФС**  
(рис. 3.10)

Тип системы индуктор-загрузка	Удельная поверхностная мощность, кВт/м <sup>2</sup>	Температура нагрева, °С	Электрический КПД	Коэффициент мощности	Мощность устройств, кВт
а	2–700	600	0,8–0,95	0,4–0,8	5–2500
б	2–50	200	0,7–0,9	0,3–0,6	5–300
в	10–100	300	0,8–0,95	0,5–0,7	5–100
г	5–50	300	0,6–0,9	0,4–0,7	0,5–100
д	0,5–5	300	1,0*	0,8–0,9	0,5–30
е	0,05–0,1**	150	0,7–0,8	0,4–0,6	40–100

\* Указан полный коэффициент полезного действия (тепловые потери незначительны).  
\*\* Приведена удельная мощность на единицу массы загрузки, кВт/кг

Основными элементами установки ИНФС являются собственно нагревательное устройство, источник питания, конденсаторная батарея и система управления.

В качестве источников питания используются нерегулируемые и регулируемые трансформаторы, автотрансформаторы и тиристорные регуляторы – блоки питания. В установках применяются силовые конденсаторы общепромышленного применения. Управление режимом работы осуществляется либо по прямым параметрам: температура и мощность, либо по различным косвенным параметрам: время нагрева, электрическое сопротивление системы индуктор – загрузка и др. Специально для установок ИНФС разработаны способы и системы управления, основанные на таких косвенных параметрах как гармонический состав тока индуктора, конфигурация электромагнитного поля в зазоре между индуктором и загрузкой и активное сопротивление системы индуктор – загрузка с учетом значения напряженности магнитного поля на поверхности ферромагнитной загрузки [5].

Устройство ИНФС содержит следующие элементы: индуктор, магнитопровод и тепловую изоляцию (футеровку).

Индукторы для низкотемпературного нагрева на промышленной частоте различаются по следующим основным признакам: материал индуктирующего провода, вид охлаждения, форма сечения индуктора, электрическая изоляция, механическое крепление, конфигурация индуктирующего провода.

Для снижения электрических потерь индукторы изготавливают из меди или алюминия. Однако в специальных случаях применяют комбинированный индукционно-резистивный нагрев с использованием индукторов из конструкционной углеродистой или нержавеющей стали.

В зависимости от значения удельной поверхностной мощности  $p_0$  выбирается тип охлаждения индуктора. При значении  $p_0$  до  $50 \text{ кВт/м}^2$  возможно естественное конвективное охлаждение, при  $p_0 = 50\text{--}100 \text{ кВт/м}^2$  можно применять принудительное воздушное охлаждение и при больших значениях  $p_0$  – водяное охлаждение. Следует отметить, что данная рекомендация справедлива именно при нагреве ферромагнитной стали, т.е. при высоком значении электрического КПД.

В качестве индукторов могут быть использованы проводники с трубчатым или сплошным сечением. Необходимо при этом соблюдать условие минимума потерь при выборе толщины проводника или стенки трубки, которые должны превышать в 1,3 раза глубину проникновения для данного материала.

Электрическая изоляция между витками индуктора может обеспечиваться либо за счет воздушных промежутков, либо с применением изоляционных материалов. Используются лакоткани и стеклоткани с пропиткой электроизоляционным лаком, а также другие изоляционные материалы. В качестве индукторов используются изолированные обмоточные провода, например, типов ПДА, ПСД, ПСДК и др., а также кабели.

Для механического крепления индуктора используются фиксация витков с помощью стяжных шпилек или изоляционных брусков (пластин), заливка индукторов эпоксидной смолой, бетонирование индукторов. Если индукционное устройство представляет собой крупногабаритную камеру, то индуктирующий провод крепится к ее стенкам на изоляторах.

Конфигурация индуктирующего провода повторяет обычно конфигурацию загрузки, а, следовательно, применяются соленоидальные индукторы круглого, овального и прямоугольного сечений, а также плоские индукторы. Однако, как видно из рис. 3.10 конфигурации индукторов весьма разнообразны. Находят все большее применение стержневые индукторы, используемые как для нагрева плоских поверхностей, так и изделий цилиндрической формы при условии их вращения в ходе нагрева.

Для улучшения энергетических характеристик во многих случаях индукторы снабжаются магнитопроводами, выполненными в виде пакетов из листов электро-технической стали марок 1511, 1512, 3411, 3412 толщиной 0,5 или 0,35 мм. В зависимости от типа системы индуктор – загрузка и геометрических размеров при использовании магнитопроводов электрический КПД увеличивается на 5–30% и коэффициент мощности – на 10–50%.

Применяются как замкнутые магнитопроводы, так и разомкнутые в виде отдельных пакетов или более сложной формы, например, П – и Ш – образные.

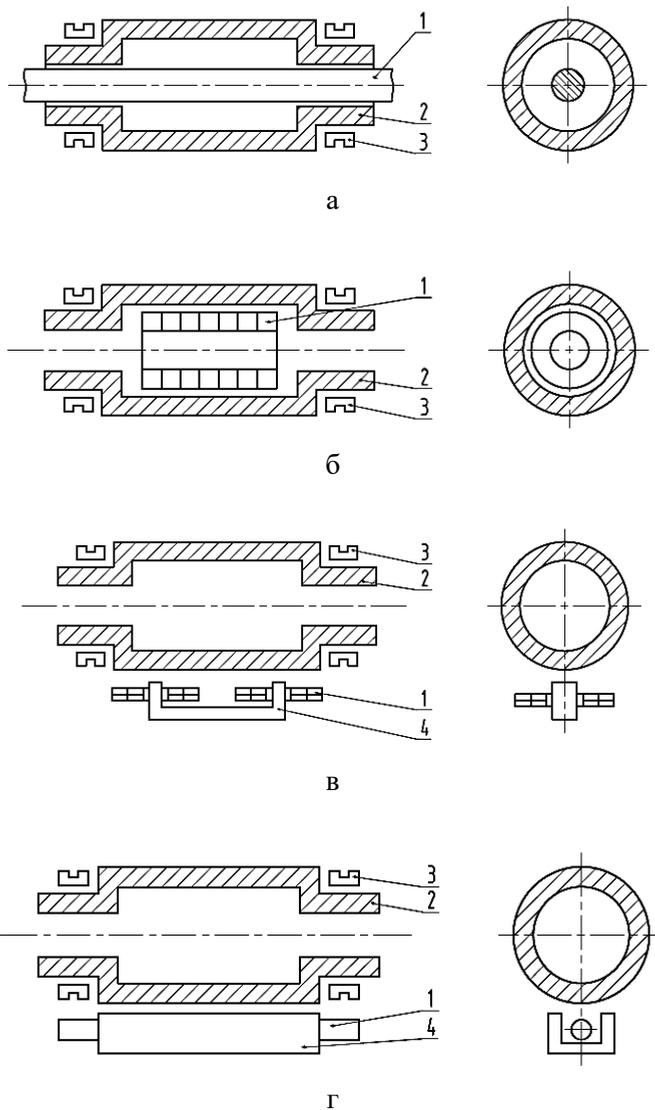
Теплоизоляция в большинстве устройств является необходимым элементом конструкции, несмотря на относительно низкие рабочие температуры. Особенно важна хорошая теплоизоляция для устройств ИНФС, работающих в непрерывном режиме или при длительном цикле периодического режима работы. В качестве теплоизоляции используются изделия в виде плит, листов, матов, засыпки, ваты из следующих материалов: асбеста, вермикулита, стекла, слюды, минералов, шлака и т.п.

Эти теплоизоляционные материалы работают при температурах 450–600°С, имеют малую плотность – обычно 120–600 кг/м<sup>3</sup> и коэффициент теплопроводности 0,04–0,15 Вт/(м·К).

Рассмотрим некоторые примеры конструктивного выполнения устройств ИНФС, в которых наиболее сильно выражена их специфика.

В ряде производств, например, химической, текстильной и бумагоделательной промышленности, существует задача нагрева вращающихся валков цилиндров, каландров, натяжных роликов и подобных элементов. В этом случае особенно важно такое преимущество индукционного нагрева как бесконтактность.

На рисунке 3.63 показаны варианты схем конструктивного выполнения вращающихся валков с индукционным обогревом. По схеме (а) внутри валка размещен штыревой индуктор. Несмотря на простую конструкцию, она имеет существенный недостаток, так как для питания индуктора требуется очень низкое напряжение, а, следовательно, требуется понижающий трансформатор, и появляются из-за больших токов значительные потери энергии в токопроводах. Схема (б) с внутренним расположением индуктора имеет хорошие энергетические показатели, но применяемая электрическая изоляция должна быть рассчитана на рабочую температуру. В схеме (в) использовано устройство с разомкнутым магнитопроводом. Такая компоновка должна быть согласована с другим технологическим оборудованием и условиями эксплуатации. Устройство по схеме (г) обогревается стержневым индуктором с разомкнутым магнитопроводом. В этом случае индуктор подключается к питающей сети также, как и при схеме (а), через понижающий трансформатор.

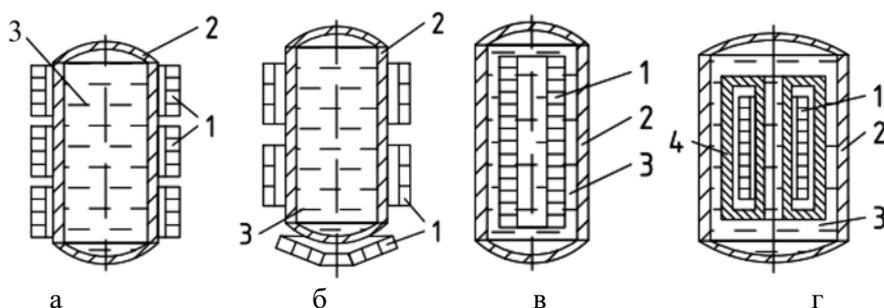


**Рис. 3.63. Схемы конструктивного выполнения вращающихся валков с индукционным обогревом:**

- а – с экранированным индуктором; б – с внутренним индуктором;
- в – с индуктором на разомкнутом магнитопроводе;
- г – со стержневым наружным индуктором;
- 1 – индуктор; 2 – валок; 3 – опора; 4 – магнитопровод

Для обогрева химических реакторов используются различные конструкции индукционных устройств, при этом индукторы могут размещаться как снаружи корпуса реактора, так и внутри него (рис. 3.64). Индуктор по схеме (а) может

быть в однофазном или трехфазном исполнении в зависимости от мощности. При использовании трехфазного индуктора, выполненного в виде трех катушек, возникает задача устранения переноса мощности, т.е. равномерной загрузки фаз. Обычно применяют магнитопроводы или электромагнитные экраны, препятствующие электромагнитной связи между катушками. При конструктивном выполнении реактора по схеме (б) обычно две фазы подключают к боковым цилиндрическим индукторам, а третий индуктор для обогрева дна имеет плоскую или коническую форму. Размещение индуктора внутри реактора, см. схему (в), энергетически выгодно, так как электрические потери в индукторе также идут на нагрев продукта. Однако в этом случае надо решать проблемы надежности электрической изоляции. Универсальный погружной индукционный нагреватель представлен на схеме (г). В отличие от предыдущей конструкции здесь имеется собственный корпус нагревателя, в котором и преобразуется в теплоту электромагнитная энергия.



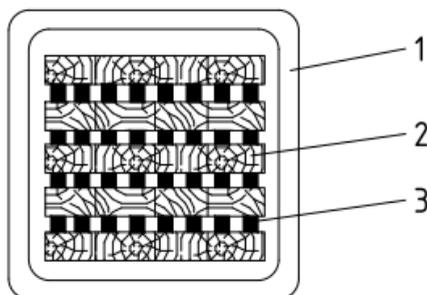
**Рис. 3.64. Схемы конструктивного выполнения химических реакторов с индукционным обогревом:**

1 – индуктор; 2 – реактор; 3 – нагреваемый продукт;  
4 – корпус погружного нагревателя

Следует указать, что наряду с требованиями по высоким энергетическим характеристикам к химическим реакторам с индукционным обогревом предъявляются требования удобства эксплуатации и высокой надежности.

Косвенный нагрев продукта может быть осуществлен с использованием системы индуктор – загрузка, представленной на рис. 3.10е. Устройства такого типа применяют, например, для термообработки железобетонных изделий, когда за счет индуцированных токов нагревается стальная арматура, а от нее теплота передается бетону, и для сушки древесины в штабеле. В этом случае (рис. 3.65) между рядами древесины закладывают ферромагнитные стальные элементы, выполненные из стальных полос толщиной 3 мм, которые служат тепловыделяющими элементами. Штабель устанавливают в сушильную камеру. Индуктор в виде кабеля, шины или провода крепится к стенкам, потолку и полу камеры на

изоляторах. Камеры имеют значительные размеры, например,  $3,7 \times 4,4 \times 14,0$  м, температура нагрева до  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , мощность до 100 кВт. Для интенсификации тепло- и массообмена устанавливаются вентиляторы.



**Рис. 3.65. Схема индукционного устройства для сушки древесины:**

1 – индуктор; 2 – слой древесины;

3 – ферромагнитный тепловыделяющий элемент

В некоторых рассмотренных устройствах индуктор не имел принудительного охлаждения и выполнял также функции нагревателя сопротивления, т.е. в этих устройствах используется комбинированный индукционно-резистивный нагрев. Соотношение составляющей мощности, передаваемой нагрузке за счет электромагнитного поля, и составляющей мощности, передаваемой от индуктора-нагревателя за счет излучения и конвекции, определяется физическими свойствами материалов индуктора и загрузки (электропроводность, излучательная способность), а также геометрических размеров, формы и их взаимного расположения.

Выше в разделе 3.7 уже шла речь о применении устройств ИНФС для обогрева трубопроводов для поддержания определенной температуры транспортируемого продукта (нефть, сера, вода и др.). Для таких технологических процессов, в которых нагрев стальных изделий используется, главным образом, для компенсации тепловых потерь: обогрев трубопроводов, резервуаров, бункеров и т.д., требуются малые удельные поверхностные мощности (до  $5\text{ кВт/м}^2$ ) и, соответственно, слабые магнитные поля ( $H < 4000\text{ А/м}$ ). При этом на параметры электромагнитного поля начинает заметно сказываться влияние *потерь энергии на гистерезис*, что необходимо учитывать в расчетах характеристик устройств, например, при расчете устройств индукционного и комбинированного индукционно-резистивного нагрева стальных изделий на промышленной частоте, в частности труб (схемы устройств, а также направления протекания токов в них показаны на рис. 3.31), возникает задача учета мощности потерь на перемагничивание стали (гистерезис) [10, 24].

К индукционным и индукционно-резистивным нагревателям трубопроводов предъявляются следующие требования: ограничение по значению питающего напряжения (обычно  $U < 5,0$  кВ), минимальное напряжение на единицу длины ( $U_1$ , В/м), минимальное напряжение на наружной поверхности трубки ( $u_n$ , В/м), технологичность изготовления, малая металлоемкость и т.д.

Сравнение расчетных характеристик вариантов устройств индукционного нагрева и индукционно-резистивного нагрева (рис. 3.31) показало, что вариант индукционно-резистивного нагрева предпочтительнее, так как при этом помимо одностороннего подвода питания достигаются меньшие значения  $u_n$  (значения удельной мощности  $P$  одинаковы). Однако вариант устройства индукционного нагрева имеет определенное преимущество, связанное с технологией монтажа системы обогрева, так как трубка нагревателя может быть выполнена из отдельных, электрически не связанных участков [24].

Все же наибольшее применение для обогрева трубопроводов находят *индукционно-резистивные системы нагрева (ИРСН)*.

Питание ИРСН, как правило, осуществляется от источника напряжения промышленной частоты.

Как уже было сказано выше, ИРСН нашли свое применение в сфере промышленного обогрева трубопроводов. На сегодняшний день это практически единственный экономически оправданный способ обогрева трубопроводов длиной более 3 км. ИРСН обеспечивает разогрев, поддержание технологической температуры, а также защиту от замерзания трубопроводов (рис. 3.66).



Рис. 3.66. Обогреваемый трубопровод и смонтированная на нем ИРСН

Основными объектами, на которые устанавливаются такие системы, являются: водоводы (при освоении и эксплуатации всех видов месторождений), выкидные линии (транспортируемые продукты – сырая нефть и нефтепродукты),

серопроводы (транспорт жидкой серы), трубопроводы транспорта вязких химических веществ (внутризаводские межцеховые трубопроводы предприятий химии и нефтехимии), газопроводы (ИРСН противоконденсатного действия).

### 3.10.3. Индукционная поверхностная закалка

Закалкой называется процесс фиксации неравновесной структуры при обычной температуре. Особенности структурных превращений стали при нагреве отражены в диаграмме железо–углерод (рис. 3.67).

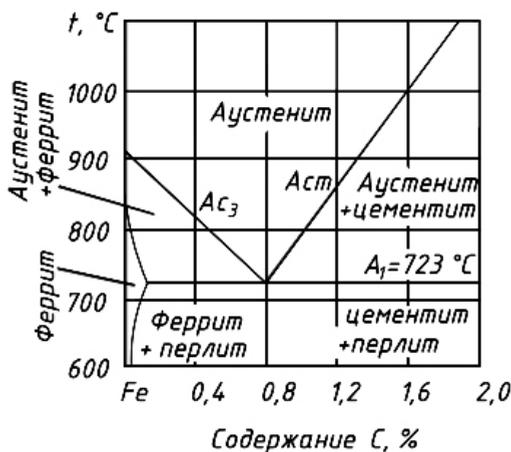


Рис. 3.67. Диаграмма состояния сплавов железо–углерод при нагреве

До температуры 723°C железо образует кристаллическую решетку в виде объемно-центрического куба и способно растворять не более 0,008% углерода. Эта модификация названа  $\alpha$ -железом, а твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе называется феррит. Железо образует с углеродом также химическое соединение  $Fe_3C$  – цементит.

Для сталей характерно поликристаллическое строение (зернистое), при этом зерна могут иметь различную структуру: ферритную, цементитную и перлитную, состоящую из пластин феррита и цементита. Содержание углерода в перлите составляет 0,8%, поэтому сталь, в которой содержится 0,8% углерода, имеет чисто перлитную структуру и называется эвтектоидной. Стали с содержанием менее 0,8% C состоят из перлита и феррита, а стали с большим содержанием углерода – из перлита и цементита.

При температуре выше 723°C (линия A<sub>1</sub>) перестраивается кристаллическая решетка железа в границентрический куб ( $\gamma$ -железо), эта модификация способна растворить до 2% углерода. Раствор углерода в  $\gamma$ -железе называется аустенитом. Однородная аустенитная структура достигается при медленном нагреве стали до

температур выше линии  $A_{C3}$ , а в промежуточных областях доэвтектоидные стали имеют смешанную структуру: аустенит и феррит и заэвтектоидные стали состоят из аустенита и цементита.

При быстром охлаждении аустенита атомы углерода не успевают путем диффузии выделиться из кристаллической решетки вновь образовавшегося  $\alpha$ -железа и, таким образом, образуется пересыщенный раствор углерода в  $\alpha$ -железе, называемый мартенситом. За счет искажений кристаллической решетки стали мартенсит обладает весьма высокой твердостью, т.е. способностью оказывать большое сопротивление проникновению в него другого тела. Однако мартенсит хрупок, он плохо воспринимает ударную нагрузку, поэтому часто закаленные изделия проходят дополнительную термообработку – отпуск с целью некоторого снижения хрупкости и твердости и повышения ударной вязкости.

Индукционный нагрев за счет высокой концентрации энергии позволяет быстро нагревать изделия, при этом зерна стали не успевают увеличиться. В результате после закалки получается мелкоигльчатый или безыгльчатый мартенсит с высокими механическими свойствами.

Например, для стали 40 различие в характеристиках после закалки в индукционной установке и пламенной печи составляет:

	Индукционная установка	Пламенная печь
Предел прочности на изгиб, МПа	44,6	38,2
Предел прочности на разрыв, МПа	25,3	19,2

Индукционный нагрев под закалку позволяет получить твердость закаленной стали более высокую, чем при обычном медленном нагреве, для конструкционных сталей на 6–8 единиц Роквелла и для инструментальных сталей на 3–5 единиц.

Помимо закалки для получения мартенситной структуры, так называемой истинной закалки, иногда осуществляют закалку с целью получения промежуточных структур – закалка на троостит или сорбит.

Для доэвтектоидных сталей температура нагрева под закалку при небольших скоростях нагрева определяется линией  $A_{C3}$ , а для заэвтектоидных сталей в связи с высокой твердостью цементита достаточен нагрев выше линии  $A_1$ .

Для получения деталей, хорошо работающих на износ и воспринимающих ударную и изгибающую нагрузку, применяют *поверхностную закалку*. В результате получают твердую поверхность, а сердцевина детали остается вязкой. Распределение температуры при нагреве и твердости  $HRC$  после закалки показано на рис. 3.68. Под глубиной закаленного слоя понимают расстояние от поверхности детали до слоя со структурой, содержащей 50% мартенсита. Этой структуре для каждой марки стали соответствует определенная температура нагрева и определенная твердость после закалки. Глубина закаленного слоя  $Z_k$  выбирается исходя из условий работы детали, например, при работе на истирание  $Z_k = 2\text{--}3$  мм, а при работе также и на смятие  $Z_k = 4\text{--}5$  мм [22, 25].

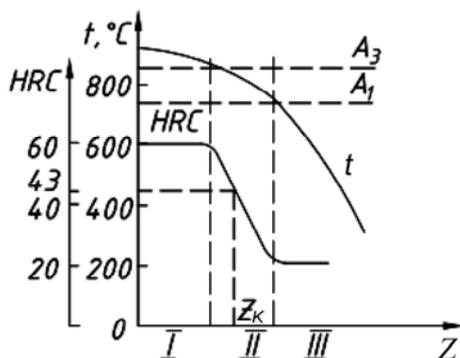


Рис. 3.68. Зависимости температуры при нагреве и твердости после закалки от координаты для стали 45: указаны слои I, II, III с различными структурами

Особенностью поверхностной закалки является необходимость высоких скоростей нагрева (100–500 К/с), что позволяет избежать сквозного прогрева детали. Так как время нагрева под закалку оказывается очень малым и соизмеримым со временем протекания процессов диффузии, то в конце нагрева может не достигаться равномерное распределение углерода, т.е. не достигается однородная аустенитная структура. Для повышения скорости диффузии несколько увеличивают температуру нагрева под закалку, причем тем больше, чем выше скорость нагрева. В таблице 3.8 [22] приведены марки сталей, наиболее широко используемых в технологии индукционной поверхностной закалки, указан их химический состав, наибольшее достигаемое значение глубины закаленного слоя, поверхностная твердость и значения температур нагрева при различных скоростях нагрева.

Таблица 3.8

### Характеристики сталей, применяемых при индукционной поверхностной закалке

Марка стали	Химический состав, %			$z_k$ , мм	HRC	Температура нагрева, °C при скорости нагрева, К/с		
	Углерод С	Марганец Mn	Кремний Si			до 100	до 250	до 500
35	0,32–0,40	0,5–0,8	0,17–0,37	3	50–56	880–920	910–950	970–1050
45	0,37–0,45	0,5–0,8	0,17–0,37	4	55–62	850–890	880–920	930–1000
40X	0,36–0,45	0,5–0,8	0,17–0,37	6	54–56	860–900	880–920	940–1000
У12	1,15–1,24	0,15–0,3	0,15–0,30	2	60–64	800–840	820–880	840–920
ШХ15	0,95–1,10	0,2–0,4	0,1–0,30	8	62–64	900–940	–	–
55ПП	0,55–0,63	до 0,2	0,10–0,30	2	59–61	900–1000	–	–
Чугун СЧ 21-40	2,8–3,0	0,3–0,5	2,5–3,2	5	45–53	880–900	900–920	–

Примечание: Содержание других элементов в сталях: 40X – 0,8–1,1% хрома; ШХ15 – 1,3–1,65% хрома; 55ПП – 0,28% никеля, 0,15% хрома и 0,2% меди.

Прокаливаемость стали, т.е. свойство стали воспринимать закалку на определенную глубину, зависит от ее химического состава. Прокаливаемость сталей определяется на эталонных по размерам образцах при стандартных условиях их нагрева и охлаждения. Прокаливаемость углеродистых сталей достигает 15 мм, а высоколегированных сталей – до 50 мм. Легирующими элементами, увеличивающими прокаливаемость, являются хром, никель, марганец и некоторые другие.

К процессу охлаждения стальной детали предъявляются высокие требования. В зависимости от марки стали требуются различные скорости охлаждения, которые достигают значения 2000 К/с. Некоторые высоколегированные стали воспринимают закалку даже при естественном воздушном охлаждении, т.е. для них не требуются высокие скорости охлаждения. В качестве охлаждающей среды могут быть использованы вода, водяной пар, масло, водные растворы глицерина, марганцовокислого калия и других веществ. Охлаждение производится подачей струи жидкости на закаливаемую поверхность с применением душевого устройства (спреера) или путем помещения нагретой детали в бак с охлаждающей жидкостью. Время охлаждения составляет обычно 4–5 с. При охлаждении водой с использованием спреера расход воды составляет 0,015–0,12 л/(с·см<sup>2</sup>).

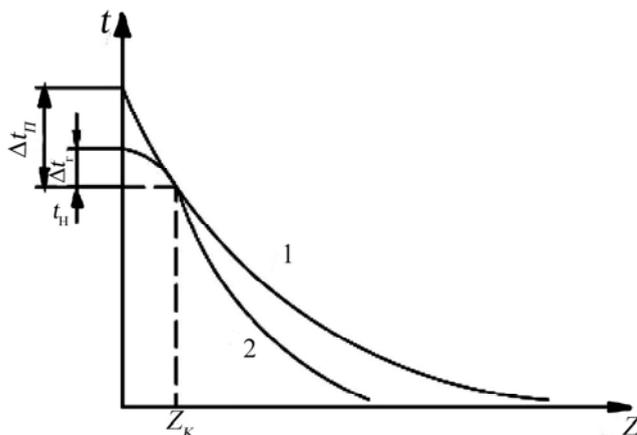
Следует отметить, что надежным средством повышения равномерности нагрева и охлаждения детали является ее вращение, однако это возможно не во всех случаях.

Процессы нагрева и охлаждения деталей при закалке сопровождаются возникновением значительных термических напряжений, которые могут привести к короблению детали, образованию микротрещин и отколов. Другими причинами брака являются неравномерный нагрев или охлаждение закаливаемой поверхности детали.

Индукционная поверхностная закалка обычно применяется в массовом производстве, и процесс закалки в высокой степени автоматизируется. При этом контроль качества закалки организуется так, чтобы избежать массового брака. Различают две группы методов контроля закаленных деталей: методы, не связанные с разрушением детали, и методы с разрушением детали.

К *основным параметрам* индукционной закалочной установки относятся глубина закаленного слоя, частота, удельная поверхностная мощность, время нагрева, метод нагрева, геометрические размеры индуктора, электрические и энергетические характеристики.

Глубина закаленного слоя  $z_k$  задается технологами и по этому параметру может быть выбрана частота тока. Различают два варианта нагрева под поверхностную закалку: глубинный или поверхностный виды нагрева (рис. 3.69). При глубинном нагреве глубина проникновения электромагнитной волны в горячий металл, т.е. при температуре выше точки Кюри, примерно равна глубине закаленного слоя. При этом перегрев поверхности  $\Delta t_r$  по отношению к температуре на глубине  $z_k$  невелик.



**Рис. 3.69.** Распределение температуры в нагреваемом изделии при поверхностном (1) и глубинном (2) нагреве

При поверхностном нагреве глубина проникновения  $\Delta$  много меньше глубины закаленного слоя, при этом перепад температуры  $\Delta t_n$  существенно выше, чем при глубинном нагреве (рис. 3.69).

Выбор частоты при глубоком и поверхностном нагреве производится по рекомендациям в [22].

Сравнивая глубинный и поверхностный виды нагрева следует отметить, что качество закалки при глубинном нагреве выше, а потребление энергии относительно меньше, чем при поверхностном нагреве. Последняя величина характеризуется тепловым КПД поверхностной закалки по В.П. Вологдину, определяемому по формуле

$$\eta_{т.в.} = \frac{t_n \cdot z_k}{\int_0^{\infty} t dz} \quad (3.90)$$

Для получения хорошего качества переходной области, т.е. слоя между мартенситом и исходной структурой, во избежание сколов и трещин оптимальное значение теплового КПД должно быть  $\eta_{т.в.} = 0,25 - 0,5$ .

Обычно глубинный нагрев под поверхностную закалку применяют в крупносерийном производстве, а поверхностный вид нагрева – в случае мелкосерийного производства. В зависимости от вида нагрева выбирают удельную поверхностную мощность: при поверхностном нагреве  $p_0$  не выше  $0,2-0,5$  кВт/м<sup>2</sup> и при глубинном –  $p_0 = 0,5-2,0$  кВт/м<sup>2</sup>. Время нагрева под поверхностную закалку может быть определено по графикам зависимости  $\tau_n$  от частоты  $f$ , глубины закаленного слоя  $z_k$ , диаметра детали  $d_2$  и удельной поверхностной мощности  $p_0$ . Пример такой зависимости для частоты 8000 Гц приведен на рис. 3.70.

По значению удельной поверхностной мощности и площади энергоспринимающей поверхности детали  $S_2$  определяют активную мощность, потребляемую деталью

$$P_2 = p_0 S_2 . \quad (3.91)$$

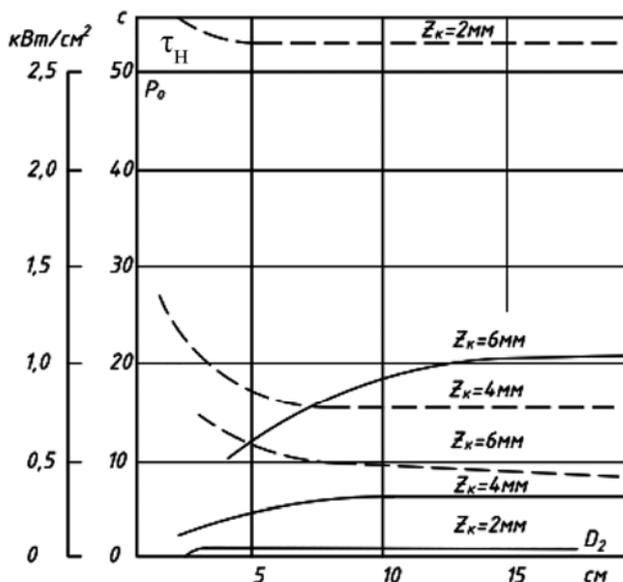
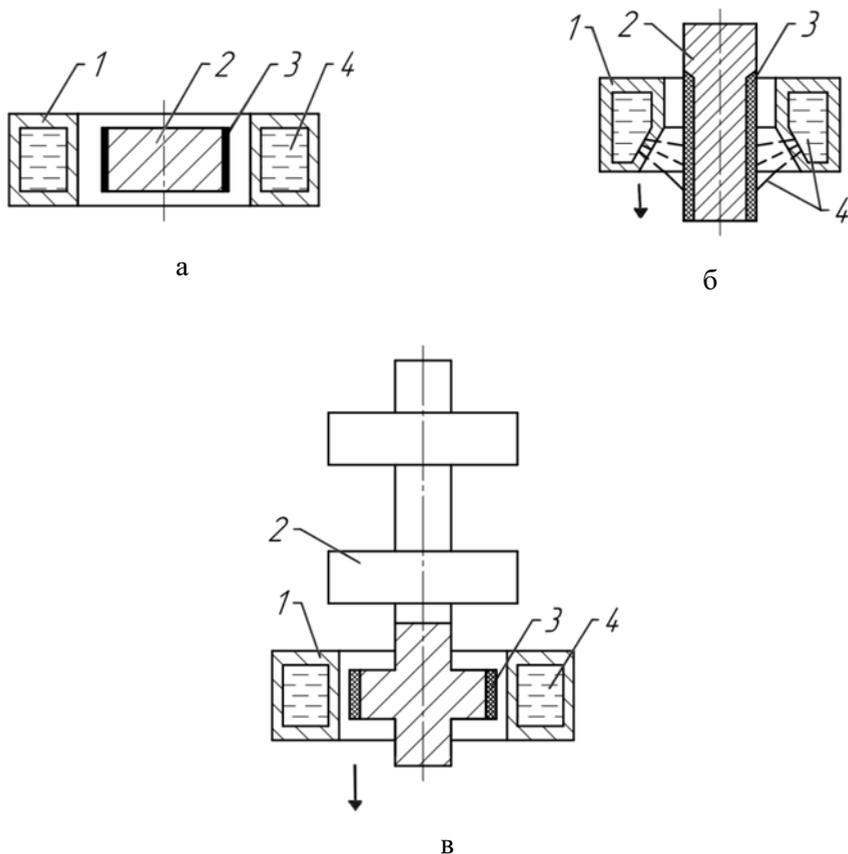


Рис. 3.70. Зависимости времени нагрева (сплошная линия) и удельной поверхностной мощности (штриховая) от диаметра детали и глубины закаленного слоя для частоты 8000 Гц

Различают три метода осуществления процесса индукционной поверхностной закалки, различающиеся последовательностью нагрева, охлаждения и перемещения детали (рис. 3.71).

Одновременная закалка характеризуется одновременным нагревом всей подлежащей закалке поверхности детали без ее поступательного перемещения с последующим охлаждением этой поверхности тем или иным методом, например, путем сброса детали в бак с охлаждающей средой или с помощью душевого устройства, причем индуктор может быть совмещен с душем (рис. 3.71 а). В последнем случае во внутренней боковой поверхности индуктора делаются отверстия, через которые по окончании нагрева подается на нагретую поверхность детали вода. В ходе нагрева индуктирующий провод не охлаждается, и индуктор может сам нагреться до температуры 200 – 250 °С. Этим способом можно вести закалку относительно небольших по площади поверхностей, иначе потребуется очень большая установленная мощность преобразователей частоты, как это видно из формулы (3.91).



**Рис. 3.71. Методы индукционной поверхностной закалки:**  
 а – одновременная; б – непрерывно-последовательная; в – поочередная  
 1 – индуктор; 2 – деталь; 3 – закаливаемый слой; 4 – охлаждающая вода  
 Стрелка указывает направление перемещения детали

При необходимости осуществления закалки больших поверхностей, например, длинного вала, применяется метод непрерывно-последовательной закалки (рис. 3.71б). При этом методе деталь или индуктор перемещаются, причем индуктор в данный момент времени нагревает локальный участок поверхности детали, который затем охлаждается. Используется отдельное душевое устройство или, как это показано на рисунке, душ совмещен с индуктором. Процесс проходит непрерывно: ранее нагретый участок охлаждается, а новый участок нагревается. Мощность источника питания определяется значением площади нагреваемой поверхности, однако из-за усиленного отвода теплоты в осевом направлении удельная поверхностная мощность при этом методе возрастает на 20–30% по сравнению с одновременной закалкой. Скорость переме-

щения индуктора относительно детали (или наоборот – детали относительно индуктора) в этом методе зависит от необходимого времени нагрева, как и при одновременной закалке, с учетом подстуживания близкорасположенного участка охлаждения. При малой скорости перемещения не удастся получить большую глубину закаленного слоя.

При закалке распределительных валиков, коленчатых валов и других подобных деталей, у которых необходимо закаливать несколько участков поверхности, применяется метод поочередной закалки. Поочередная закалка может осуществляться при последовательной подаче и установке в индукторе подлежащих закалке участков, при этом в ходе перемещения индуктор отключается (рис. 3.71 в). В другом варианте поочередной закалки каждый подлежащий закалке участок помещается в свой индуктор, а затем индукторы включаются поочередно и также поочередно подается закалочная среда. Так может проводиться закалка деталей, которые нельзя перемещать в индукторе, например, коленчатые валы.

В комплект оборудования индукционной закалочной установки входит: источник питания (на средние частоты – статический преобразователь частоты, на высокие частоты – транзисторный генератор и на промышленную частоту – трансформатор); закалочный индуктор; закалочный трансформатор; конденсаторная батарея; система водоохлаждения для индуктора, источника питания и конденсаторов; система охлаждения нагретой детали; силовое электрооборудование (контакты, разъединители, шины, кабели); аппаратура управления, сигнализации и защиты; измерительные приборы и трансформаторы; приспособления и механизмы для установки, перемещения и вращения деталей (патроны, приводные двигатели, редукторы, направляющие, шаблоны и т.д.).

Коэффициент трансформации закалочных трансформаторов определяется значениями напряжения преобразователей средней частоты (400, 800, 1600 В и др.) и напряжения на закалочном индукторе (5–50 В). Вследствие необходимости смены индукторов часто требуется ступенчатое регулирование напряжения закалочных трансформаторов.

Закалочные индукторы на средние частоты часто выполняются массивными, одновитковыми. Материал индуктора – медь. Основными элементами индуктора являются индуктирующий провод, соединительные шины и колодки для подключения к закалочному трансформатору. Индуктирующий провод может быть совмещен со спреером. Соединительные шины обычно охлаждаются водой (рис. 3.72). Между шинами устанавливается электроизоляционная прокладка. Часто индуктирующий виток вытачивается на токарном станке, а затем к нему тугоплавким припоем припаиваются соединительные шины, рубашка или трубки водоохлаждения и другие элементы.



**Рис. 3.72. Процесс непрерывно-последовательной индукционной поверхностной закалки**

### ***3.10.4. Индукционный нагрев под сварку и пайку***

#### *Индукционная сварка*

Индукционная сварка успешно применяется для изготовления металлических оболочек кабеля, получения прямошовных и спиралешовных труб, замкнутых и незамкнутых профилей и других изделий. Различают два варианта сварки: сварка плавлением и сварка давлением. В первом варианте, например, при сварке изделий по отбортованным кромкам, образуется ванна расплавленного металла и формирование сварного шва происходит под влиянием воздействия сил гравитации, поверхностного натяжения и электродинамических. Во втором варианте свариваемые кромки прижимаются друг к другу с определенным усилием ( $2,5\text{--}4,0 \text{ кг/мм}^2$ ), при этом их температура соответствует температуре пластического состояния (для стали  $1380\text{--}1420 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Наиболее широко применяется индукционная сварка изделий из следующих металлов и сплавов: малоуглеродистой стали, аустенитной стали, медных сплавов и алюминиевых сплавов.

Особенно широко применяется индукционная сварка в трубном производстве для стыковой сварки труб, изготовления прямошовных труб различных диаметров, изготовления спиралешовных и оребренных труб. Рассмотрим подробнее процесс и оборудование для сварки прямошовных труб из ленты. Лента последовательно проходит клетки формовочного стана, где она сворачивается в трубную заготовку и поступает в шовообжимочную клетку, в которой осуществляется сварка.

На практике применяют несколько схем сварки прямошовных труб (рис. 3.73).

При использовании линейного индуктора с магнитопроводом (рис. 3.73 а) ток на свариваемых кромках течет в одну сторону, что обеспечивает минимальную неравномерность нагрева при достаточно высоком КПД. Частота тока выбирается в зависимости от толщины стенки и для стальных труб можно пользоваться следующими рекомендациями [22].

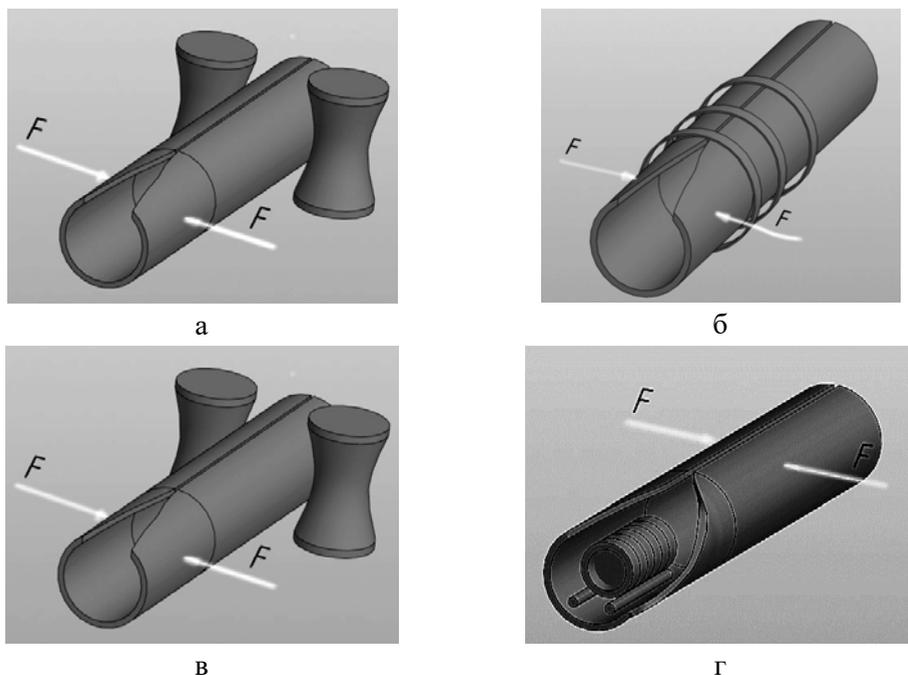
Толщина стенки, мм	1,5–3,5	2,5–5,5	4,5–9,0	6,5–13,0
Частота, кГц	8–10	4	2,4	1

Однако при одинаковом направлении токов на свариваемых кромках процесс характеризуется широкой зоной нагрева и малой скоростью нагрева, поэтому более широко применяется схема индукционного нагрева с использованием охватывающего индуктора (рис. 3.73 б), при которой по свариваемым кромкам текут токи встречного направления. В этом случае ток концентрируется на свариваемых кромках (проявление эффекта близости) и равномерность нагрева слабо зависит от частоты, что позволяет повысить частоту тока для увеличения удельной поверхностной мощности. Такая схема нагрева может обеспечить весьма высокие скорости нагрева, отличается малым объемом нагреваемого до высокой температуры металла и ведется с приложением давления как при оплавлении, так и без оплавления свариваемых поверхностей. Индуктор устанавливается на расстоянии 30–300 мм от места схождения свариваемых кромок.

Индуктор для сварки труб может устанавливаться и внутри трубной заготовки (рис. 3.73 в). Обычно такая схема может быть реализована при сварке труб большого диаметра, например, диаметром 203–530 мм, с применением частот 8–10 кГц. Внутренний индуктор обеспечивает ряд преимуществ, к которым относятся более высокие электрический КПД и коэффициент мощности, уменьшение нагрева обжимных роликов, возможность выбора длины индуктора без учета расположения обжимных роликов. Недостатками являются необходимость применения магнитопровода, необходимость защиты индуктора от искр и брызг расплавленного металла, сложность изготовления и размещения индуктора. При выборе длины внутреннего индуктора учитывается, что с ее увеличением возрастает электрический КПД системы индуктор – нагрузка, но, с другой стороны, возрастают потери энергии на прогрев большей площади поверхности трубной заготовки. Обычно выбирают длину индуктора равной 0,6–1,0 диаметра трубы. Индуктор устанавливают на расстоянии 50–100 мм от места схождения свариваемых кромок – ставить дальше нецелесообразно, так как увеличится расход электроэнергии, а при более близком расположении возрастает поток искр и брызг металла.

Представленная на рис. 3.73 г схема сварки с контактным (кондуктивным) подводом применяется при частотах более 60 кГц. Контакты изготавливаются из сплавов вольфрама или бронзы и устанавливаются от места схождения кромок на

расстоянии 30 – 200 мм. Контакты скользят по поверхности трубной заготовки и работают в напряженных условиях: к ним предъявляются требования высокой электро- и теплопроводности, достаточно высоких механической прочности и температуры плавления. Плотность тока в контактном пятне – до  $1,5 \text{ кА/мм}^2$ . На рисунке показаны катящиеся контакты-ролики, при этом усилие поджатия может достигать 1–3 тс (тонна-сила). По оценкам контактный подвод электроэнергии выгоднее индукционного в плане снижения потерь для сварки труб большого диаметра (свыше 219 мм).



**Рис. 3.73. Схемы сварки прямошовных труб:**  
 со стержневым индуктором (а); с цилиндрическим индуктором (б);  
 с внутренним индуктором (в); с контактным подводом тока (г)  
 Указано направление приложения сил

### *Индукционная пайка*

Пайка – это процесс получения неразъемного соединения деталей путем смачивания, растекания и заполнения зазора между ними расплавленным припоем и сцепления их при кристаллизации шва. Пайка осуществляется при нагреве до температур плавления припоя, но более низких, чем температуры плавления материалов деталей.

Для нагрева под пайку используются различные виды оборудования в том числе различные виды электротермических установок. Индукционный нагрев по сравнению с альтернативными видами нагрева имеет следующие преимущества:

- меньшее коробление изделия благодаря местному нагреву паяемого соединения;
- глубинный характер нагрева и высокая степень концентрации энергии, обеспечивающие высокую скорость нагрева и производительность;
- незначительное окисление материалов благодаря кратковременности нагрева;
- высокое качество пайки за счет точного дозирования энергии и регулирования процесса нагрева;
- улучшение условий труда.

Применение индукционной пайки связано с некоторыми особенностями и ограничениями, к которым относятся большие капитальные затраты, необходимость разработки и изготовления специальных индукторов и оснастки, применение специальных припоев и флюсов.

Индукционная пайка наиболее эффективна в массовом производстве, например, производство радиодеталей, напайка твердосплавных пластинок на резцы, пайка велосипедных рам, трубчатых электронагревателей (ТЭН), контактных узлов электроаппаратов и т.д.

Рассмотрим вопросы технологии индукционной пайки.

Наиболее часто индукционная пайка применяется для соединения деталей из следующих материалов: углеродистые, легированные и нержавеющие стали, чугуны, медь и сплавы на ее основе, алюминий и его сплавы, никель, серебро, твердые сплавы, магниевые сплавы, титановые сплавы.

Применяемые припои должны хорошо смачивать материалы паяемых деталей и поэтому подбираются специально. В зависимости от температуры плавления выделяют пять групп припоев.

Особо легкоплавкие припои (температура плавления  $t_{пл}$  ниже 145 °С), к которым относятся галлиевые и висмутовые припои. Для этих припоев индукционный нагрев обычно не применяется.

Легкоплавкие припои ( $t_{пл} = 145–450$  °С) включают в себя оловянно-свинцовые, цинковые и некоторые серебряные припои. Для этих припоев нагрев электропаяльниками или электроплитами по экономическим показателям часто предпочтительнее, чем индукционный нагрев.

Для целей индукционной пайки используются припои с более высокой температурой плавления: среднеплавкие ( $t_{пл} = 450–1100$  °С), высокоплавкие ( $t_{пл} = 1100–1850$  °С) и тугоплавкие ( $t_{пл} > 1850$  °С). Состав среднеплавких припоев и материалы паяемых деталей приведены в табл. 3.9. К высокоплавким и тугоплавким припоям относятся платиновые припои, припои на основе титана и железа.

Поверхности деталей необходимо готовить под пайку, а именно хорошо очистить от окисной пленки, жира, краски и т.п. Поверхность детали должна быть нагрета до соответствующей температуры. При нагреве могут образовываться окислы, поэтому для защиты от окисления и удаления образовавшихся окислов применяют флюсы, составы некоторых приведены в табл. 3.9. Для защиты от окисления индукционную пайку можно проводить также в вакууме или контролируемой атмосфере (водород, диссоциированный аммиак, смесь угарного и углекислого газов и др.).

Таблица 3.9

**Некоторые среднеплавкие припои, паяемые материалы  
и флюсы при индукционной пайке**

Припои	Температура пайки, °С	Паяемые металлы	Компоненты флюса
Серебряные	500–850	Медные и никелевые сплавы, стали, серебро	Фтористый калий, фторборат калия, борный ангидрид
Серебряные Медно-цинковые	600–950	Медь, стали, серебро	То же
Медно-цинковые Медные	800–1150	Медь, латунь, бронзы, твердые сплавы, чугун, углеродистая сталь, нержавеющая сталь	Бура, борная кислота, фтористый кальций
Алюминиевые	420 – 620	Алюминий и его сплавы	Хлористый калий, хлористый литий, фтористый натрий, хлористое олово
Алюминиевые	500–600	Титановые сплавы	Хлористый натрий, хлористый калий, хлористое серебро, фтористый литий
Магниевые	540–600	Магниевые сплавы	Хлористый калий, хлористый натрий, хлористый литий, фтористый натрий, фтористый литий

При индукционной пайке припой располагается так, чтобы при его расплавлении зазор между паяемыми деталями был заполнен. Весьма важным является выбор зазора, так как при малых зазорах менее 0,01–0,05 мм припой плохо

заполняет зазор, см. рис. 3.74, область I графика, хотя капиллярные силы велики. Область II наиболее соответствует условиям индукционной пайки. Область III (увеличенные зазоры) подходит для ручной пайки. Наконец, зазоры в области IV слишком велики, что снижает прочность паяного соединения. Как видно из качественного графика (рис. 3.75), прочность соединения максимальна при оптимальном значении зазора. Рекомендации по выбору зазоров для некоторых припоев приведены в табл. 3.10.

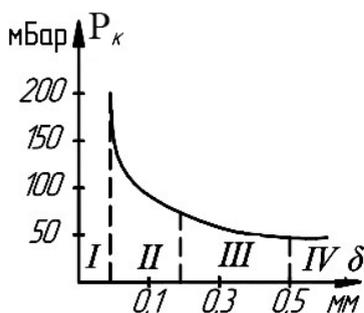


Рис. 3.74. Зависимость капиллярного давления от зазора. Указаны характерные области значений зазора

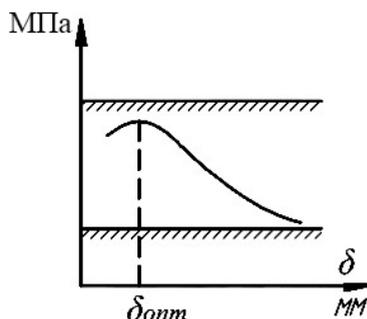


Рис. 3.75. Зависимость прочности паяного соединения от зазора. Указано оптимальное значение зазора

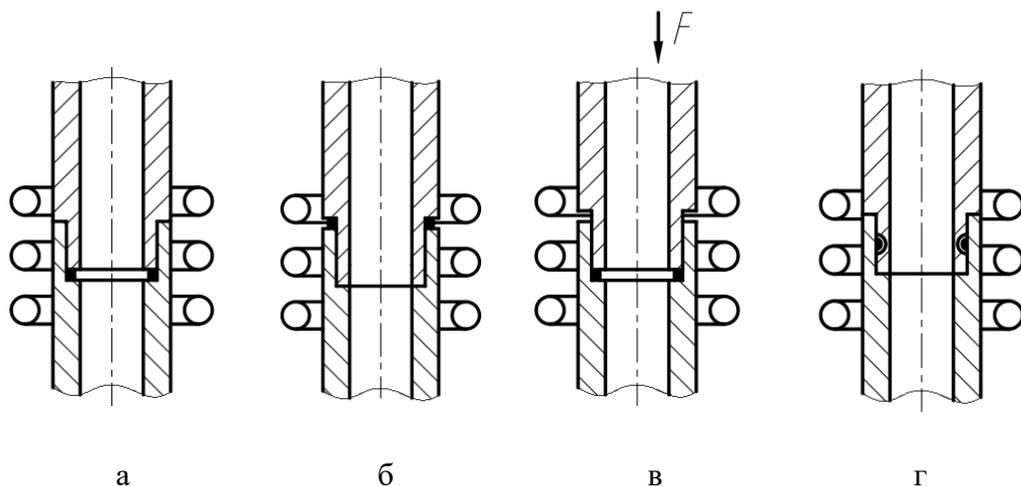
Таблица 3.10

### Рекомендуемые зазоры (мм) при индукционной пайке

Паяемые металлы	Припой			
	Медный	Медно-цинковый	Медно-фосфористый	Серебряный
Медь и ее сплавы	–	0,04–0,20	0,04–0,20	0,04–0,25
Углеродистая и низколегированная сталь, чугун	0,01–0,05	0,05–0,25	–	0,02–0,15
Нержавеющая сталь	0,01–0,10	0,02–0,12	–	0,05–0,10

Выбор оптимальной конструкции паяного соединения производится с учетом достижения наибольшей механической прочности и удобства подвода энергии индукционным методом. На рисунке 3.76 приведены варианты выполнения паяного соединения труб с использованием индукционного нагрева. В варианте (а) при нагреве зазор между трубами несколько увеличивается и припой за счет капиллярных сил поднимается. Необходимо отметить, что в этом случае припой нагревается от внешней трубы. В варианте (б) припой расплавится раньше, но здесь движению припоя помогают силы гравитации. При пайке в варианте (в)

верхняя труба опускается вниз, а припой за счет смачиваемости и капиллярного эффекта занимает зазор. Во внутренней трубе в варианте (г) сделана проточка для размещения припоя перед пайкой. При расплавлении припоя затекает в зазор между трубами. Из рисунка 3.75 видно, что пайке предшествует обработка деталей. При этом обеспечиваются необходимые размеры зазоров, при выборе которых необходимо учитывать коэффициенты теплового расширения материалов. С уменьшением размеров деталей следует уменьшить зазор. При применении флюса зазор увеличивается, т.к. в него должен проникать припой, вытесняя оттуда расплавленный флюс.



**Рис. 3.76. Варианты выполнения паяного соединения с использованием индукционного нагрева.**

Указано размещение припоя:

- а – на внутренней поверхности; б – на внешней поверхности;
- в – на внутренней поверхности с поджатием; г – в кольцевом пазе

Индукционная пайка характеризуется быстрым нагревом и действием электродинамических сил на проводящие материалы, что приводит к интенсификации движения расплавленного припоя, активизации действия флюса, улучшению смачиваемости поверхностей деталей и лучшему заполнению зазора припоем. Обычно для пайки тонкостенных деталей используют высокие частоты (66; 440; 1760 кГц), а для пайки более массивных деталей – средние частоты (до 10 кГц). Время нагрева обычно не превышает 5–10 с. При определении потребляемой мощности исходят из массы нагреваемого металла, его удельной теплоемкости, температуры и времени нагрева. Полный КПД индуктора при пайке принимается равным в режиме периодического нагрева: для стали 0,7–0,8 и для меди 0,3–0,4, а в режиме непрерывного нагрева с учетом дополнительного отсоса

энергии: соответственно 0,5–0,6 и 0,15–0,25. На практике мощность источника питания высокой частоты (транзисторного генератора) выбирается из условия 1 кВт мощности на высокой частоте на 1 см<sup>2</sup> нагреваемой поверхности.

В качестве источников питания используют на высоких частотах транзисторные генераторы мощностью от 4 до 200 кВт, а на средних частотах тиристорные и транзисторные инверторы соответствующей мощности.

Конструкции индукторов для пайки весьма разнообразны, так как согласуются с конструкцией паяемого узла. При этом необходимо выполнять известные требования для достижения наибольшего электрического КПД системы индуктор – нагрузка: берется материал индуктора с минимальным удельным электрическим сопротивлением, толщина стенки индуктора должна не менее, чем в 1,3 раза, превышать глубину проникновения, зазоры между индуктором и нагрузкой должны быть минимальны и т.д.

На рисунке 3.77 рассмотрены некоторые варианты паяных соединений и конструкций индукторов для пайки.

На рисунке 3.77 а, б рассмотрены самые простые варианты паяных соединений и конструкций индукторов для пайки: цилиндрические одновитковый (а) и многовитковый (б) индукторы, применяемые при индивидуальной пайке.

Более сложные конструкции индуктирующего провода используются для групповой пайки, например, одновременно двух паяных соединений (в) или четырех (г). В последнем случае применяется конструкция индуктора, позволяющая осуществить непрерывный процесс при перемещении ленты конвейера с установленными на ней изделиями.

Индукционная пайка дает возможность одновременно обрабатывать несколько соединений. Так индуктор сложной формы (д) позволяет сразу вести пайку двух соединений. В данном случае изделие целесообразно при нагреве вращать.

На схемах (е) и (ж) показана пайка фланца к трубе, установленной на специальном приспособлении. Нагрев может выполняться с использованием наружного или внутреннего индуктора.

Установки для пайки включают в себя технологическую оснастку для фиксации паяемого соединения, а также оборудование для создания защитной атмосферы или вакуума. В этом случае делаются специальные герметичные камеры для проведения технологического процесса. Требования к герметизации при использовании защитных (контролируемых) атмосфер менее жесткие, чем при вакуумной пайке, что связано не только с работой уплотнений, но и с опасностью электрического пробоя индуктора. В целом к камерам для пайки в вакууме или контролируемой атмосфере предъявляются те же требования (защита от нагрева электромагнитным полем, охлаждение корпуса, герметизация электрических вводов и др.), что и в установках индукционной вакуумной плавки.

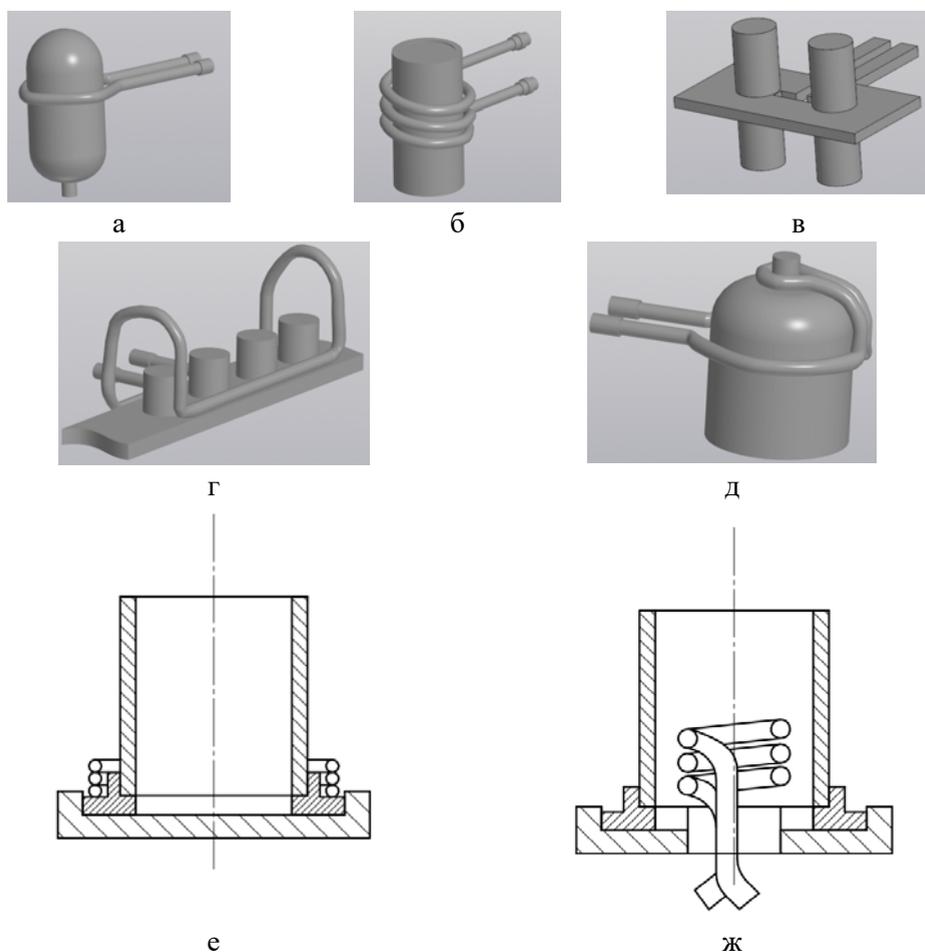
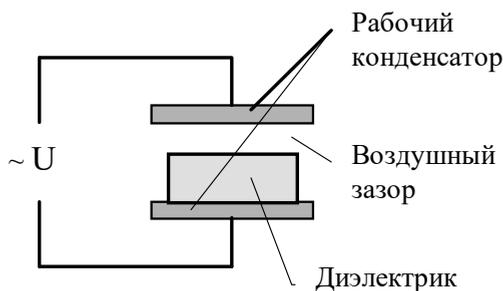


Рис. 3.77. Варианты конструктивного выполнения индукторов для пайки

### 3.11. Установки диэлектрического нагрева

#### 3.11.1. Принцип действия и основные характеристики

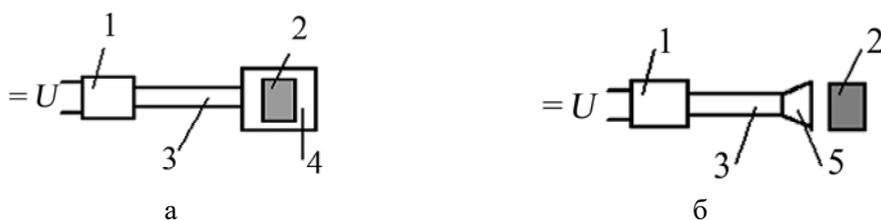
Нагрев диэлектриков в переменном электромагнитном поле может быть реализован с использованием тока высокой частоты или энергии сверхвысоких частот (СВЧ). Нагреваемый диэлектрик (загрузка) располагается в высокочастотной ЭТУ в электромагнитном поле рабочего конденсатора, в частном случае между его пластинами (рис. 3.78). В общем случае конфигурация рабочего конденсатора определяется формой загрузки и требованиями технологии.



**Рис. 3.78. Нагрев диэлектрика в высокочастотной установке**

В СВЧ-установках нагрев диэлектрика осуществляется в электромагнитном поле внутри полого резонатора или в зоне действия рупорных излучателей-антенн (рис. 3.79 а, б).

Источниками питания установок диэлектрического нагрева являются ламповые или транзисторные генераторы высокой частоты, а также для диапазона СВЧ магнетроны.



**Рис. 3.79. Схемы установок СВЧ для нагрева диэлектрика в полом резонаторе (а) и с использованием излучателя (б):**

1 – магнетрон; 2 – диэлектрик; 3 – волновод; 4 – резонатор; 5 – излучатель

Основные преимущества установок диэлектрического нагрева: возможность равномерного нагрева загрузки по всему объему, возможность избирательного нагрева неоднородных по диэлектрическим свойствам загрузок, бесконтактный способ подведения энергии для нагрева, высокие скорости нагрева, легкость автоматизации.

Также как и для индукционных установок недостатками установок диэлектрического нагрева следует считать их высокую стоимость и сложность оборудования в эксплуатации.

Расчет устройства диэлектрического нагрева может основываться в общем случае на решении дифференциальных уравнений электромагнитного поля или на приближенном определении выделяющейся мощности для случая малого изменения напряженности электрического поля в загрузке.

Из системы уравнений Максвелла и уравнений связи (3.1)–(3.6) можно получить дифференциальное уравнение для напряженности электрического поля в инвариантной форме в виде:

$$\nabla^2 \dot{E} = \dot{\gamma}^2 \dot{E}, \quad (3.92)$$

где коэффициент  $\dot{\gamma}^2$  равен

$$\dot{\gamma}^2 = -\omega \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu. \quad (3.93)$$

Отсюда получим

$$\dot{\gamma} = j\omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}. \quad (3.94)$$

Решение уравнения (3.92) с использованием выбранной системы координат позволяет определить распределение напряженности электрического поля  $E$  в нагреваемом диэлектрике, а затем и найти распределение выделяющейся в нем мощности в зависимости от координат.

Так как во многих практических задачах расчета процесса диэлектрического нагрева глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрик, см. формулу (3.10), во много раз превышает размеры загрузки, то для расчета может быть использовано выражение для удельной объемной мощности  $p_{ov}$  как произведения напряженности электрического поля  $E$  на активную составляющую плотности тока смещения  $J_{cm} = \partial D / \partial \tau$ , т.е.

$$p_{ov} = E \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial D}{\partial \tau} \right\}. \quad (3.95)$$

При расчете устройств диэлектрического нагрева также возникают задачи учета нелинейных свойств диэлектрика: относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\varepsilon$  и  $tg \delta$ ), которые могут зависеть от параметров электромагнитного поля ( $E$  и  $f$ ) и ряда других факторов, а также учета формы нагреваемого диэлектрика и конфигурации электромагнитного поля.

Аналогично теории индукционного нагрева для решения задач диэлектрического нагрева могут быть использованы аналитические и численные методы, а также физическое моделирование.

### 3.11.2. Физические основы диэлектрического нагрева

Диэлектрики характеризуются разнообразием своей микроструктуры (кристаллические и аморфные материалы, жидкости, в том числе электролиты, газы) и практически полным отсутствием свободных электрических зарядов. Однако

при наложении внешнего электрического поля с напряженностью  $E_{\text{вн}}$  во всех диэлектриках наблюдается явление поляризации, которое характеризуется разделением связанных электрических зарядов внутри диэлектрика и образованию на границах диэлектрика нескомпенсированных электрических зарядов. В результате этого возникает внутреннее электрическое поле в материале, направленное навстречу внешнему полю, и напряженность электрического поля в диэлектрике снижается.

Таким образом, поляризация, которая характеризуется вектором  $P$ , – это возникновение заряженности диэлектрика под действием внешнего электрического поля (рис. 3.80).

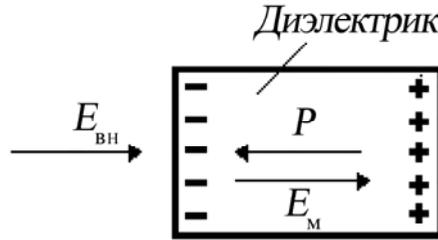


Рис. 3.80. Явление поляризации диэлектрика

Для математического описания явления поляризации вводится вектор электрического смещения  $D$ , значение которого одинаково как вне, так и внутри диэлектрика:

$$D = \epsilon_0 E_{\text{вн}} = \epsilon_0 E_{\text{м}} - P = \epsilon_0 \epsilon_{\text{м}} E_{\text{м}} . \quad (3.96)$$

Здесь  $E_{\text{м}}$  и  $E_{\text{вн}}$  – значения напряженности электрического поля в диэлектрике и в воздухе,  $\epsilon_0 = 1 \cdot 10^{-9} / (36 \pi) = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная и  $\epsilon_{\text{м}}$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала, которая показывает во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике меньше напряженности внешнего электрического поля.

В переменном электрическом поле картина разделения зарядов внутри диэлектрика меняется каждую половину периода, т.е. нескомпенсированные заряды на границе диэлектрика меняют свой знак, и при этом возникают потери энергии, которые характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$ , который определяется как отношение активной мощности  $P$  к реактивной  $Q$  или, приближенно при малых значениях  $\text{tg } \delta$ , к полной  $S$  мощности в диэлектрике:

$$\text{tg } \delta = \frac{P}{Q} = \frac{P}{S} . \quad (3.97)$$

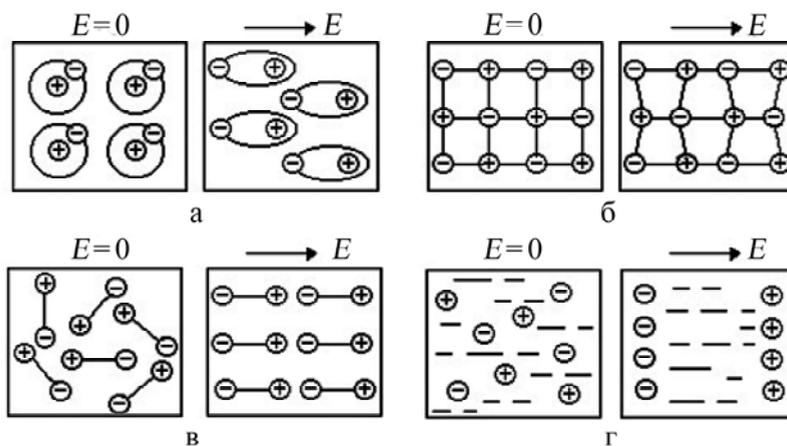
Активная мощность  $P$ , выделяющаяся в диэлектрике, прямо пропорциональна произведению ( $\epsilon_{\text{м}} \cdot \text{tg } \delta$ ), что следует из уравнения (3.11).

Физический механизм потерь энергии определяется типом диэлектрика, но, в общем, объясняется неупругими соударениями связанных заряженных частиц и повышением скорости их случайных (тепловых) движений.

Рассмотрим основные типы физического механизма поляризации диэлектриков (рис. 3.81).

Можно выделить две группы диэлектриков, исходя из скорости протекания процесса и количественной оценки выделяющейся энергии.

Первая группа диэлектриков, в которых поляризация проходит практически мгновенно и с минимальным выделением теплоты. К ней относятся два типа механизма поляризации.



**Рис. 3.81. Типы поляризации диэлектриков:**  
электронная (а), ионная (б), дипольная (в) и электролитическая (г)

Электронная поляризация характеризуется упругим смещением и деформацией электронных оболочек атомов (рис. 3.81 а). Такой тип поляризации характерен, например, для некоторых полимеров (полистирол, полиэтилен, фторопласт, парафин, нафталин), а также для некоторых газов и органических жидкостей (водород, бензол).

Ионная поляризация (рис. 3.81 б), характеризующаяся смещением ионов в кристаллической решетке диэлектрика. К первой группе относятся кристаллические диэлектрики с плотной упаковкой атомов (кварц, слюда).

Вторая группа включает диэлектрики, в которых поляризация совершается во времени относительно медленно и сопровождается большим выделением энергии. К ней относятся следующие типы поляризации диэлектриков.

Ионная (ионно-релаксационная) поляризация кристаллических диэлектриков с неплотной упаковкой атомов, например, некоторых солей (хлористый натрий), неорганических стекол и подобных стеклообразных материалов (фарфор, микалекс).

Дипольная поляризация веществ, которые уже имеют дипольную структуру (рис. 3.81 в), например, органические жидкие и твердые вещества (эпоксидные смолы, целлюлоза), дистиллированная вода.

Электролитическая поляризация (рис. 3.81 г), характерная, например, для водных растворов солей-электролитов. Отметим, что диссоциированные ионы солей электрически связаны с молекулами воды, имеющими дипольную структуру, и поэтому их движение затруднено.

В некоторых материалах одновременно присутствуют несколько видов поляризации. Такой тип поляризации называют макроструктурной поляризацией, и она проявляется в диэлектриках с неоднородной структурой, например, в слоистых и сыпучих материалах (фанера, влажные опилки, керамика и т.п.).

Расположение связанных электрических заряженных частиц в диэлектриках в отсутствие внешнего электрического поля ( $E = 0$ ) и при его наложении (напряженность  $E$ ) показано на рис. 3.81. Из рисунка видно, что на границах диэлектрика образуются нескомпенсированные электрические заряды, создающие внутреннее электрическое поле, в результате чего напряженность электрического поля в материале снижается.

Электрофизические свойства диэлектриков: относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_m$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  различаются в очень широких пределах, что видно из табл. 3.11.

Таблица 3.11

**Относительная диэлектрическая проницаемость  
и тангенс угла диэлектрических потерь  
некоторых диэлектриков (при  $f = 1$  МГц)**

Диэлектрик	$\epsilon_m$	$\operatorname{tg} \delta$
Фторопласт	1,9–2,2	0,0001–0,0002
Полистирол	2,6–2,7	0,0003–0,0005
Полиамидные смолы	3–8	0,02–0,2
Пластикаты (полихлорвинил)	4–5	0,06–0,1
Клеи специальные	50–88	0,8–1,2
Вода дистиллированная	80	0,01

В целом, можно сделать вывод, что диэлектрики первой группы характеризуются более низкими значениями  $\epsilon_m$  и  $\operatorname{tg} \delta$  по сравнению с диэлектриками второй группы и поэтому в соответствии с формулой для удельной объемной мощности (3.11) для повышения интенсивности их нагрева необходимо увеличивать напряженность электрического поля в материале  $E_m$ .

Электрофизические свойства диэлектриков зависят от частоты электромагнитного поля. Можно указать общую закономерность для этих зависимостей. Так относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_m$  с ростом частоты  $f$  несколько уменьшается в связи с инерционностью движения заряженных частиц, что приводит к уменьшению поляризации. Для зависимости  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  характерно наличие максимума, объясняемого совпадением частоты электромагнитного поля и собственной резонансной частотой заряженных частиц (рис. 3.82).

Можно отметить, что частота, соответствующая максимуму  $\text{tg}\delta$ , зависит от массы заряженной частицы и связана с типом поляризации диэлектрика. Так для диэлектриков с электронным типом поляризации резонансные частоты имеют значения  $1 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$  Гц, для диэлектриков с ионной поля-

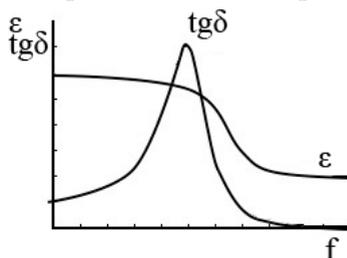


Рис. 3.82. Зависимости  $\epsilon_m$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  (для политрифторхлорэтилена)

поляризацией —  $1 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14}$  Гц, для диэлектриков с дипольной поляризацией —  $1 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$  Гц и для диэлектриков с дипольной поляризацией —  $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^8$  Гц.

Укажем, что зависимости  $\epsilon_m$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты, приведенные на рис. 3.82 конкретно для политрифторхлорэтилена, справедливы далеко не для всех диэлектрических материалов и могут быть не столь простыми.

Помимо частоты на электрофизические свойства диэлектриков влияют также температура, влажность, давление, анизотропия и напряженность электрического поля (для определенных материалов).

Зависимости  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  диэлектриков от температуры  $t$  также могут иметь различный вид. Для многих типов диэлектриков увеличение температуры  $t$  приводит к уменьшению  $\epsilon_m$ , так как интенсифицируется неупорядочное тепловое движение частиц, уменьшающее поляризацию. Это же явление приводит к росту  $\text{tg}\delta$  с увеличением  $t$ , см. рис. 3.83. Однако свойства некоторых диэлектриков, особенно обладающих неоднородной структурой, с нагревом меняются по различным законам, что приводит к сложным зависимостям  $\epsilon_m$  и  $\text{tg}\delta$  от температуры, в том числе и с наличием экстремумов, например, для диэлектриков с дипольной поляризацией.

Таким образом, при расчете устройства для диэлектрического нагрева необходимо использовать известные электрофизические параметры нагреваемого диэлектрика, соответствующие температуре нагрева. Значения  $\epsilon_m$  и  $\text{tg}\delta$  могут быть также определены экспериментально [26].

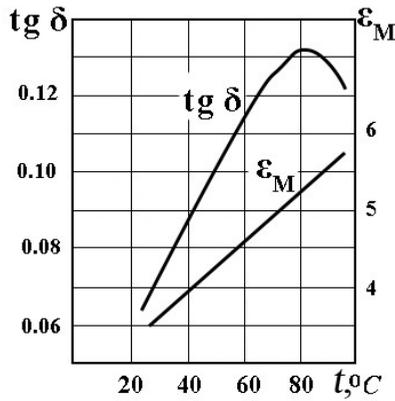


Рис. 3.83. Зависимости  $\epsilon_M$  и  $\text{tg } \delta$  диэлектриков от температуры  $t$

При проведении ряда технологических процессов диэлектрический нагрев осуществляется одновременно с прессованием материала, например, фенольных пресс-порошков (реактопластов) или пластикатов. Экспериментально показано, что  $\epsilon_M$  и  $\text{tg } \delta$  зависят от приложенного давления. Это явление объясняется уменьшением воздушных включений, выдавливанием жидких компонентов и т.п. [27]

При диэлектрическом нагреве анизотропных материалов, т.е. материалов, свойства которых в разных направлениях различны (монокристаллы, древесина), значения  $\epsilon_M$  и  $\text{tg } \delta$  также зависят от выбранного направления, что надо учитывать, например, при размещении загрузки в рабочем конденсаторе. На практике широкое распространение получил диэлектрический нагрев для сушки самых разнообразных материалов (древесина, бумага, ткань, керамика и др.). Параметры  $\epsilon_M$  и  $\text{tg } \delta$  диэлектриков сильно зависят от процента влажности  $w$  % (рис. 3.84).

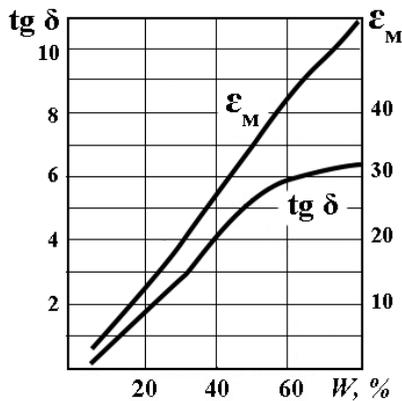


Рис. 3.84. Зависимости  $\epsilon_M$  и  $\text{tg } \delta$  от влажности  $w$  % для древесины (сосна)

Допустимые значения напряженности электрического поля в диэлектрическом материале  $E_M$  ограничиваются пробивной прочностью материала  $E_{пр}$  на данной частоте и выбираются с учетом коэффициента запаса:

$$E_M = \frac{E_{пр}}{1,5 - 2,0}. \quad (3.98)$$

Ориентировочные значения  $E_M$  (кВ/см) для различных технологических процессов приведены в табл. 3.3.

### 3.11.3. Математическое описание диэлектрического нагрева

Как уже было сказано выше, расчет устройства диэлектрического нагрева основан на решении дифференциальных уравнений электромагнитного поля (уравнений Максвелла).

Рассмотрим одномерную задачу в прямоугольных координатах и выведем выражение для глубины проникновения электромагнитного поля в диэлектрик. Исходное дифференциальное уравнение имеет вид (с использованием уравнения (3.92)):

$$\frac{d^2 \dot{E}}{dz^2} = \dot{\gamma}^2 \dot{E}. \quad (3.99)$$

Здесь введено обозначение  $\dot{\gamma}^2 = -\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon \cdot \mu$ .

Для учета активных потерь в диэлектрике вводится понятие комплексной относительной диэлектрической проницаемости:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' = \epsilon \cdot e^{j\delta}. \quad (3.100)$$

Здесь  $\epsilon''$  учитывает долю энергии электромагнитного поля, идущую на нагрев.

С учетом малого значения  $\epsilon''$  можно принимать

$$\dot{\epsilon} \approx \epsilon \cdot (1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta). \quad (3.101)$$

В формулах (3.100) и (3.101) принято, что  $\epsilon' \approx \epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ .

Введем выражение

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (3.102)$$

Здесь  $c$  – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме.

Тогда принимая  $\mu = 1$ , получим формулу для коэффициента  $\dot{\gamma}$  с учетом поглощения энергии электромагнитной волны в реальном диэлектрике (с учетом потерь):

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon}}{c} e^{j\frac{\delta}{2}}. \quad (3.103)$$

Глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрик  $\Delta$  выражается как величина, обратно пропорциональная действительной части  $\dot{\gamma}$ :

$$\Delta = \frac{1}{\operatorname{Re}(\dot{\gamma})} = \frac{2c}{\omega\sqrt{\varepsilon}\operatorname{tg}\delta}. \quad (3.104)$$

После подстановок численных значений  $c$  и  $\omega$  получим для глубины проникновения электромагнитного поля в диэлектрик  $\Delta$ , м:

$$\Delta = \frac{9,55 \cdot 10^7}{f\sqrt{\varepsilon}\operatorname{tg}\delta}. \quad (3.105)$$

Здесь размерность частоты  $f$  – Гц.

Оценим значение  $\Delta$  для дистиллированной воды с учетом ее электрофизических свойств (табл. 3.11): при частоте  $f = 1$  МГц получим  $\Delta \approx 1000$  м.

Понятно, что размеры нагреваемых диэлектриков для реальных технических целей существенно меньше и поэтому можно считать, что значение  $E_m$  во всех точках объема диэлектрика практически постоянно. Можно сделать вывод, что поверхностный эффект в диэлектриках проявляется только на сверхвысоких частотах.

Для вывода выражения для удельной объемной мощности  $p_{ov}$ , выделяющейся в диэлектрике, используем выражение, аналогичное (3.95):

$$p_{ov} = EJ_{\text{см.а}}. \quad (3.106)$$

Плотность тока смещения определяется как:

$$J_{\text{см.}} = \frac{dD}{dt} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon E. \quad (3.107)$$

Активная составляющая плотности тока смещения

$$J_{\text{см.а}} = \omega\varepsilon_0\varepsilon\operatorname{tg}\delta E. \quad (3.108)$$

После подстановки выражения (3.108) в (3.106) получим

$$p_{ov} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot E^2. \quad (3.109)$$

Если частота  $f$  в герцах, а напряженность электрического поля  $E$  в кВ/см, то удельная объемная мощность  $p_{ov}$  (Вт/см<sup>3</sup>) рассчитывается по формуле:

$$p_{ov} = 5,55 \cdot 10^{-7} \varepsilon \operatorname{tg} \delta f E^2. \quad (3.110)$$

Эта формула является основной для расчета энергетических характеристик установок диэлектрического нагрева.

На практике наиболее часто встречаются задачи нагрева диэлектрических изделий в электрическом поле плоского конденсатора.

Рассмотрим общий случай выполнения плоской системы рабочий конденсатор-загрузка (системы РК – 3) – систему при наличии воздушного зазора. Эскиз системы РК-3 и электрическая схема замещения представлены на рис. 3.85.

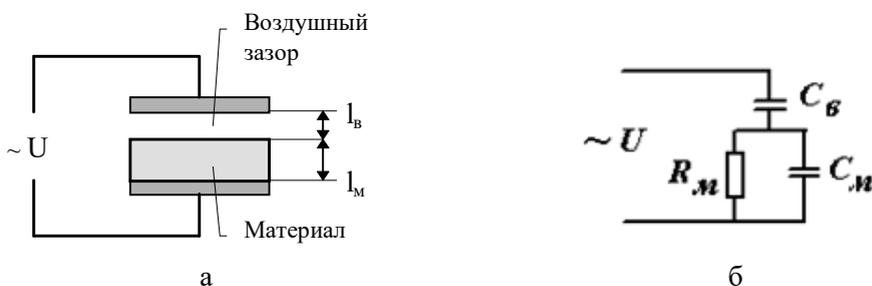


Рис. 3.85. Эскиз к расчету (а) и схема замещения (б) системы рабочий конденсатор – нагрузка

Выбор частоты для проведения процесса диэлектрического нагрева осуществляется исходя из требуемой удельной объемной мощности  $p_{ov}$ , выделяющейся в диэлектрике:

$$f = \frac{p_{ov}}{5,55 \cdot 10^{-7} \varepsilon_m \operatorname{tg} \delta E_m^2}. \quad (3.111)$$

Допустимое значение напряженности электрического поля в нагреваемом диэлектрике выбирается исходя из пробивной прочности материала с учетом коэффициента запаса, см. уравнение (3.98).

Рассчитаем элементы схемы замещения системы РК – 3 (рис. 3.85 б).

Емкость конденсатора, эквивалентная воздушному зазору, определяется по формуле

$$C_B = \frac{\varepsilon_0 S}{l_B}. \quad (3.112)$$

Емкость конденсатора, эквивалентная нагреваемому диэлектрику, определяется как

$$C_M = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_M S_M}{l_M}. \quad (3.113)$$

В формулах (3.112) и (3.113):  $l_B$  и  $l_M$  – значения воздушного зазора и толщины диэлектрика,  $S_B$  и  $S_M$  – площади соответствующих поверхностей.

Активное сопротивление, эквивалентное выделяющейся в нагреваемом диэлектрике мощности, рассчитывается по выражению:

$$R_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_M} \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.114)$$

Напряжение на рабочем конденсаторе при работе с воздушным зазором:

$$U_{p.k} = E_B l_B + E_M l_M. \quad (3.115)$$

Так как  $E_B = \epsilon_M E_M$ , то из уравнения (3.115) следует, что, изменяя зазор  $l_B$ , можно регулировать напряженность электрического поля  $E_M$  и, следовательно, удельную объемную мощность  $p_{0V}$  в нагреваемом диэлектрике.

На практике приходится решать задачи диэлектрического нагрева изделий различной формы с использованием не только плоских рабочих конденсаторов, т.е. возникает необходимость учета сложной конфигурации электрического поля, а также задачи нагрева неоднородных по объему диэлектриков или диэлектриков, свойства которых ( $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ ) зависят от параметров электромагнитного поля ( $E$  и  $f$ ). В этих случаях для расчета систем РК – 3 могут быть использованы методы математического (компьютерного) и физического моделирования.

#### ***3.11.4. Техничко-экономические характеристики и области применения промышленных установок***

Проблема нагрева диэлектрических изделий связана с низкими значениями их теплопроводности, из-за чего при поверхностном нагреве (например, в электропечах сопротивления) в изделиях возникают большие температурные перепады. Для повышения равномерности нагрева при этом приходится снижать удельную поверхностную мощность (плотность теплового потока на поверхности изделия), т.е. увеличивать время нагрева и снижать производительность оборудования.

Основные преимущества установок диэлектрического нагрева: возможность равномерного нагрева загрузки по всему объему, возможность избирательного нагрева неоднородных по диэлектрическим свойствам загрузок, бесконтактный способ подведения энергии для нагрева, высокие скорости нагрева, легкость автоматизации.

Недостатками установок диэлектрического нагрева следует считать их высокую стоимость и сложность эксплуатации.

Нагрев диэлектриков в переменном электромагнитном поле может быть реализован с использованием тока высокой частоты (ВЧ) или энергии сверхвысоких частот (СВЧ). При использовании ВЧ нагреваемый диэлектрик (загрузка)

располагается в электромагнитном поле рабочего конденсатора, например, между пластинами плоского рабочего конденсатора (рис. 3.85). В общем случае конфигурация рабочего конденсатора определяется формой загрузки и требованиями технологии. При использовании СВЧ нагрев диэлектрических материалов осуществляется либо в полых резонаторах, либо с использованием излучателей, см. раздел 3.11.5 и рис. 3.79.

Основные технические характеристики установок ВЧ- и СВЧ-нагрева приведены в табл. 3.12.

Отметим, что процесс ВЧ-нагрева характеризуется удельной объемной мощностью  $p_{ov}$  (Вт/см<sup>3</sup>), а нагрев с использованием СВЧ – удельной поверхностной мощностью  $p_{os}$  (кВт/см<sup>2</sup>).

Таблица 3.12

### Технические характеристики устройств диэлектрического нагрева

Параметр	ВЧ-нагрев	СВЧ-нагрев
Частота $f$	1,0–152,5 МГц	300, 915, 2450, 22125 МГц
Мощность $P$	1,0–1000,0 кВт	0,5–60,0 кВт
Уд. мощность $p_{ov}, p_{os}$	до 20 Вт/см <sup>3</sup>	до 10 кВт/см <sup>2</sup>
Температура нагрева $t$	до 300 °С	до 300 °С (до 2000 °С)

Наиболее часто диэлектрический нагрев применяется для следующих технологических процессов.

*Сушка материалов:* древесина, ткани, бумага, керамика, фрукты и т.д. Для повышения энергетической эффективности удаления влаги может применяться комбинация нескольких видов нагрева, например, диэлектрический и инфракрасный или диэлектрический и конвективный нагрев с использованием калориферов.

*Сварка термопластичных материалов (пластиков):* например, полиэтилен, полихлорвинил, полистирол, полипропилен. Температура нагрева до 180°С. Обычно свариваются тонкие листы, при этом свариваемые поверхности под давлением прижимаются друг к другу.

Отметим, что при этом процессе свойства исходных материалов не изменяются.

*Нагрев термореактивных материалов (реактопластов):* например, стеклопластики, фенольные смолы, эпоксидные смолы и др. При нагреве данных материалов происходят химические реакции и изменение свойств данных материалов. Часто нагрев порошков-реактопластов совмещен с прессованием изделий.

*Склеивание:* это процессы с использованием древесины (получение фанеры), керамики, пластмасс (например, пенополистирол) и др. Обычно при этом процессе нагревается и полимеризуется клей, а основной материал практически не греется, что достигается соответствующим подбором электрофизических свойств ( $\epsilon_m$  и  $\text{tg}\delta$ ) основного материала и клея.

Технические показатели, характерные для этих процессов: свойства материалов, пробивное и допустимое значения напряженности электрического поля в материале, применяемые частоты, удельные мощности и температуры приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

### Характеристики некоторых процессов диэлектрического нагрева

Применение	$\epsilon_m$	$\text{tg } \delta$	$E_m$ , кВ/см	$E_b$ , кВ/см	$f$ , МГц	$p_{ov}$ , Вт/см <sup>3</sup>	$t_n$ , °С
Сушка	< 80	0,01	0,1–1,0	1,0–1,5	< 27,0	0,3–1,0	< 100
Сварка пластикатов	2,0–5,0	0,0001–0,001	10,0–50,0	–	13,56–152,5	< 1500	< 200
Нагрев реактопластов	3,0–20	0,001–0,5	< 15,0	2,0–6,0	< 40,68	< 20	< 300
Склеивание	4,0–6,0		1,5–2,5	2,0–6,0	< 81,36	< 12	< 300

Ограничимся перечислением некоторых других технологических процессов, реализуемых с применением диэлектрического нагрева:

- приготовление и разогрев пищи в микроволновых печах,
- размораживание пищевых продуктов (рыба и др.),
- получение пенополистирола,
- стерилизация продуктов и питательных сред,
- вулканизация каучука и прогрев пористой резины,
- физиотерапия (диатермия).

По режиму работы различают установки диэлектрического нагрева периодического и непрерывного действия. В установках непрерывного действия используются механизмы для перемещения нагреваемых изделий, например, конвейер или толкатель.

На рисунке 3.86 показана схема конвейерной установки непрерывного действия для нагрева и сушки сыпучих диэлектрических материалов. Из бункера (1) сыпучий материал (2) подается на конвейер (3) и, проходя между пластинами рабочего конденсатора (4), нагревается, а затем попадает в контейнер.

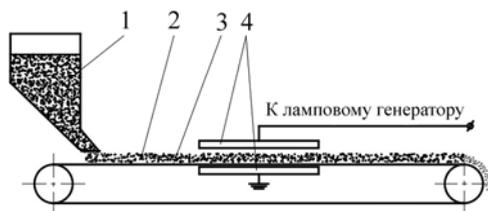


Рис. 3.86. Схема установки непрерывного действия

Эксплуатация установок диэлектрического нагрева связана с необходимостью соблюдения нормативов по ограничению значений напряженностей магнитного и электрического полей, связанных с возникновением помех для работы радиотехнических приборов и с воздействием ВЧ и СВЧ на человеческий организм. Кроме этого, в этих установках используется напряжение свыше 1000 В, что также нужно учитывать при их эксплуатации в соответствии с Правилами эксплуатации электроустановок.

### 3.11.5. Сверхвысокочастотный нагрев

С увеличением частоты тока, а, следовательно, и уменьшением длины электромагнитной волны, возникают определенные проблемы создания высокочастотных установок. При частотах выше 1,0 МГц приходится учитывать при конструировании оборудования индуктивные сопротивления соединительных шин и емкости сопротивления между проводниками.

В установках диэлектрического нагрева начинают сказываться волновые явления, так как длина электромагнитной волны оказывается соизмеримой с размерами пластин рабочего конденсатора и нагреваемого изделия, например, при частоте 300 МГц длина волны равна  $\lambda = 1$  м. Одним из следствий является образование стоячих волн, приводящих к неравномерному распределению потенциала в пластине рабочего конденсатора и, следовательно, к неравномерности распределения напряженности электрического поля в нагрузке и неравномерности ее нагрева. Поэтому размеры пластин рабочего конденсатора ограничиваются в зависимости от частоты.

В зависимости от относительного размера пластины конденсатора  $l/\lambda$  распределение  $E$  будет более или менее равномерными (рис. 3.87).

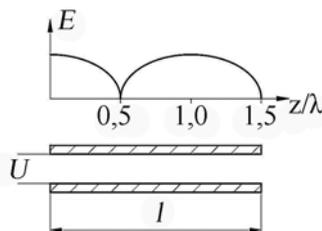


Рис. 3.87. Распределение напряженности электрического поля по пластине рабочего конденсатора

При более высоких частотах ( $> 300$  МГц) электромагнитная энергия может излучаться в пространство, т.е. проводники являются антеннами, поэтому в СВЧ установках применение обычных токоподводов становится нецелесообразным из-за повышенных потерь и излучения и вместо них используются волноводы (рис. 3.88).

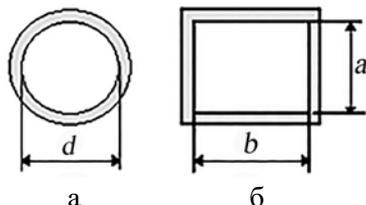


Рис. 3.88. Волноводы круглого (а) и прямоугольного (б) сечения

Вместо рабочих конденсаторов нагрев диэлектрика при использовании сверхвысоких частот осуществляется в электромагнитном поле внутри полого резонатора или в зоне действия рупорных излучателей – антенн (рис. 3.89).

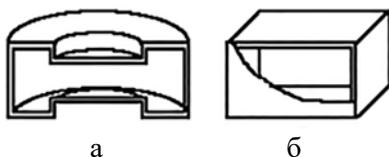


Рис. 3.89. Типы резонаторов: тороидальный (а) и прямоугольный параллелепипед (б)

Размеры волноводов круглого и прямоугольного сечения выбираются из условия

$$d \geq \lambda / 2 \text{ или } a \geq \lambda / 2. \quad (3.116)$$

Здесь  $\lambda = \frac{c}{f}$  – длина электромагнитной волны, м;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость

света в вакууме;  $a$  – меньший размер сечения волновода, т.е.  $a < b$ .

Для частот 2450 и 915 МГц применяются прямоугольные волноводы с размерами сечения  $45 \times 90$  и  $104 \times 220$  мм (соответственно).

Линейные размеры резонатора в форме прямоугольного параллелепипеда обычно равны  $5-6 \lambda$ . В резонаторе устанавливаются стоячие электромагнитные волны, при этом добиваются равномерности нагрева за счет многократных отражений волн от стенок и введению так называемых диссекторов – вращающихся металлических вертушек с несколькими лопастями.

Размеры нагреваемого изделия не должны превышать 2,5–3,0  $\Delta$ , иначе будет проявляться поверхностный эффект и внутренние области изделия будут нагреваться только за счет теплопроводности. Например, при использовании микроволновых СВЧ-печей частотой 2450 и 915 МГц для приготовления пищи значения глубины проникновения  $\Delta$  составляют соответственно 20–50 и 80–200 мм.

Проявление поверхностного эффекта в диэлектриках при СВЧ-нагреве нашло специальные применения, в частности, для разрушения горных пород за счет возникающих из-за неравномерного нагрева термических напряжений в материале.

СВЧ-нагрев применяется также, например, для получения ультрамелкодисперсных порошков металлов и их соединений с размерами частиц, измеряемых ангстремами.

В качестве генератора СВЧ-энергии используются магнетроны, принцип действия которых основан на взаимодействии потока электронов, движущегося в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях с системой полых резонаторов (рис. 3.90). Электроны эмитируются подогреваемым катодом и двигаются к аноду. Под действием постоянного магнитного поля поток электронов отклоняется и движется по спирали. При таком движении возбуждается переменное поле СВЧ в полых резонаторах и СВЧ энергия через вывод передается в волновод, по которому она поступает в полый объемный резонатор или излучатель (антенну).

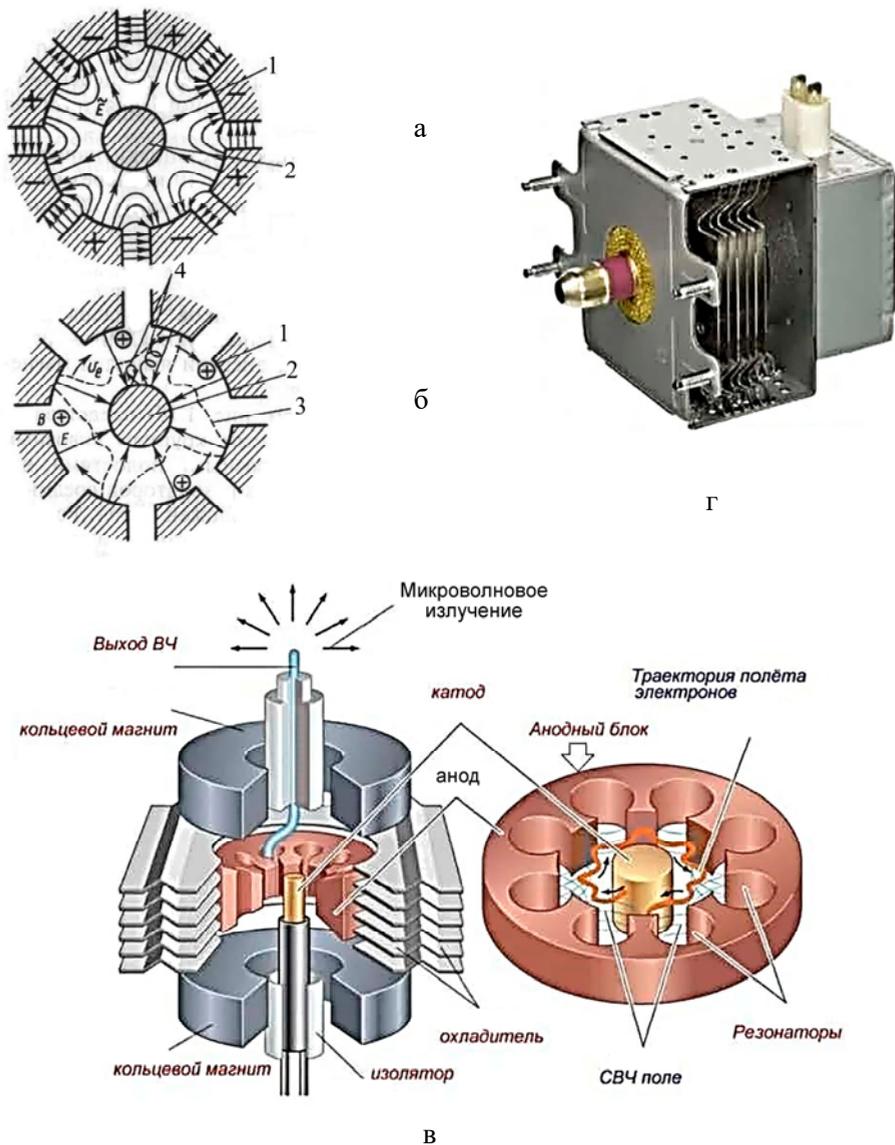
Единичная мощность магнетронов, используемых для СВЧ-нагрева, колеблется от 0,5 до 50,0 кВт.

Блок-схемы СВЧ установок для диэлектрического нагрева представлены на рис. 3.79.

### **3.11.6. Электрооборудование СВЧ-установок**

В СВЧ-установках энергия с частотой 300 МГц – 300 ГГц вырабатывается *магнетронами* (рис. 3.90). Магнетроном называют электронный прибор, генерирующий электромагнитные колебания в скрещенных электрических и магнитных полях. Постоянное электрическое поле создается в промежутке анод – катод, а постоянное магнитное поле, перпендикулярное направлению электрического поля – вдоль оси катода.

На рисунке 3.90 обозначено: 1 – заземляющая система (анод); 2 – катод; 3 – граница электронного облака; 4 – форма траектории электронов;  $E$  – силовые линии постоянного электрического поля;  $\tilde{E}$  – силовые линии электрического СВЧ-поля;  $B$  – силовые линии индукции магнитного поля;  $v_e$  – скорость переносного движения электронов.



**Рис. 3.90. К принципу действия магнетрона:**

- а – распределение высокочастотного электрического поля;
- б – форма электронного облака; в – трехмерная модель магнетрона;
- г – конструкция магнетрона

Под влиянием магнитного поля электроны изменяют направление движения, при этом их радиальная скорость переходит в тангенциальную, направленную перпендикулярно радиальной. Часть электрического СВЧ-поля проникает через щели *объемных резонаторов* анода 1, представляющего собой массивный

медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием. Каждый резонатор соединен щелью с центральным отверстием, в котором расположен катод 2 (рис. 3.90 а). Вместе они образуют кольцевую колебательную систему, которая имеет несколько резонансных частот, на которых образуется несколько стоячих волн от 1 до  $N/2$ , где  $N$  – число резонаторов. Наиболее приемлемым является вид колебаний, при котором число полуволн равно числу резонаторов, а напряжения на двух соседних резонаторах сдвинуты по фазе на половину периода. Для стабильной работы магнетрона необходимо, чтобы ближайшая резонансная частота колебаний системы значительно отличалась от рабочей частоты. В магнетронах с одинаковыми резонаторами эта разность невелика. Эту разность увеличивают введением связей в виде металлических колец, одно из которых соединяет все *четные*, а другое – все *нечетные* ламели анода, либо изменением размеров резонаторов, когда, например, все *четные резонаторы* имеют одни размеры, а *все нечетные* – другие.

При движении в тангенциальном направлении электроны тормозятся тангенциальной составляющей СВЧ-поля, поэтому их энергия, полученная от источника постоянного напряжения, преобразуется в энергию СВЧ-колебаний. Для непрерывного торможения электронов необходимо, чтобы они от одного резонатора к соседнему *перемещались за полпериода в тангенциальном направлении*. Это условие лежит в основе работы *многорезонансного магнетрона*. Синхронизация колебаний резонаторов обеспечивается *саморегуляцией* системы. Попадающие в ускоряющее СВЧ-поле электроны увеличивают свою энергию и выпадают из *синхронизма*. Они или возвращаются на катод, или попадают в тормозящее СВЧ-поле и снова входят в *синхронизм* (рис. 3.90 а,б).

Состав электрооборудования СВЧ-установки иллюстрирует схема, приведенная на рис. 3.91. Источник СВЧ-энергии включает в себя пять основных блоков: силовой – 1; выпрямитель – 2; магнетронный – 3; нагрузки магнетрона – 4 и блок управления – 5.

*Силовой блок* представляет собой тиристорный трехфазный регулятор переменного напряжения А1 с фазоимпульсным управлением и предназначен для поддержания и регулирования анодного тока магнетрона. Силовой блок включает в себя систему защиты *по дыму* (ЗД) с радиоизотопным извещателем (Изд). Напряжение с выхода тиристорного регулятора, изменяемое в диапазоне 0–380 В, поступает на силовой высоковольтный трансформатор (Тр1), максимальное напряжение на выходе которого составляет 13 кВ. Преобразование переменного напряжения в постоянное осуществляется трехфазным (нерегулируемым) диодным выпрямителем (ДВ). На выходе выпрямителя установлен двухзвенный Г-образный LC фильтр, состоящий из катушек индуктивности  $L1, L2$  и конденсаторов  $C1 - C18$ . Отрицательный вывод выпрямителя через предохранитель П подключен к катоду магнетрона (МН), а положительный – через обмотку соленоида

(Сол), амперметр  $A$  и датчики тока (ДТ) подключается к аноду магнетрона и заземляется. Источник питания (ИП) ЭРН предназначен для питания электроразрядного насоса магнетрона.

Блок управления и стабилизации (БУ) осуществляет задание и стабилизацию анодного тока магнетрона.

Регулирование тока накала осуществляется регулятором (РН) через однофазный автотрансформатор накала (Тр2) с электрическим приводом и дистанционным управлением. Измерительный трансформатор (Тр3) используется для получения сигнала обратной связи по напряжению накала.

Блок 4 СВЧ-нагрузки включает в себя калориметрическую нагрузку (КН), предназначенную для измерения выходной мощности СВЧ-энергии, наладки и испытаний источника.

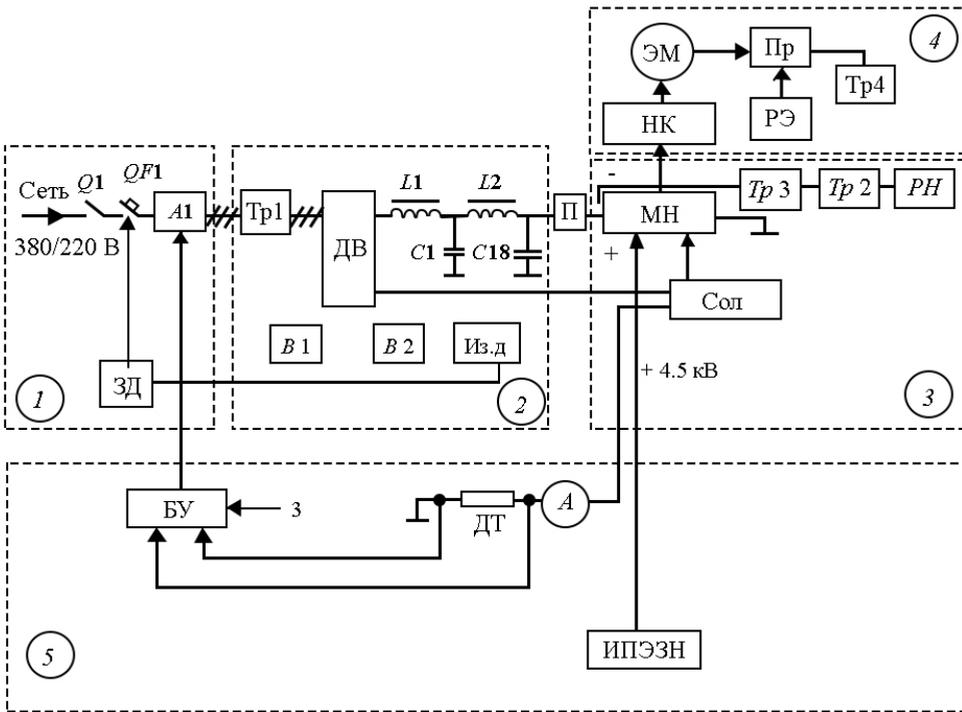


Рис. 3.91. Функциональная схема источника питания СВЧ-установки

### 3.12. Электрооборудование индукционных печей и нагревательных установок промышленной и повышенной частоты

К электрооборудованию, осуществляющему электропитание индукционных установок, относят *активные элементы* – контакторы, регулируемые источники питания промышленной частоты и преобразователи частоты, а также *пассивные элементы* – печные трансформаторы, конденсаторы и дроссели. Электрические схемы питания индукционных установок зависят от частоты, на которой работают индукционные установки, и выполняемых ими технологических задач. Электрооборудование для плавильных установок промышленной частоты включает в себя регулируемые одно- и трехфазные *печные трансформаторы*, конденсаторы и дроссели. Трансформаторы обеспечивают ступенчатое регулирование напряжения, подаваемого на индуктор. Они широко распространены в системах электропитания индукционных плавильных печей промышленной частоты, что обусловлено большими мощностями и высокими первичными напряжениями. Мощности индукционных плавильных печей достигают десятков МВА при напряжениях на первичной стороне трансформатора до 110 кВ. Очевидно, что тиристорные и тем более транзисторные преобразователи в настоящее время не обеспечивают таких показателей. Число ступеней напряжения трансформаторов общепромышленного назначения составляет от 8 до 16. Для трансформаторов специального назначения число секций может достигать 24 и 48. Увеличение числа ступеней трансформатора повышает точность и плавность регулирования напряжения, однако его конструкция усложняется.

Функциональная схема однофазного печного трансформатора приведена на рис. 3.92. При построении регулируемого трансформатора важное значение приобретает выбор регулируемой обмотки – *первичной* или *вторичной*. С точки зрения регулировочных и динамических характеристик не принципиально, в какой обмотке трансформатора (первичной  $w_1$  или вторичной  $w_2$ ) изменяется число витков. Однако установленная мощность трансформатора, определяемая произведением объема меди обмоток на объем стали сердечника, зависит от того, в какой обмотке производится переключение секций. В печных трансформаторах, имеющих высокое (6–10 кВ и более) первичное напряжение и низкое (100–500 В) вторичное, токи во вторичной обмотке достигают десятков и сотен кА [28]. Переключатель секций трансформатора при таких токах становится очень громоздким и дорогим, поэтому в печных трансформаторах переключение секций осуществляют на первичной стороне, как показано на рис. 3.92.

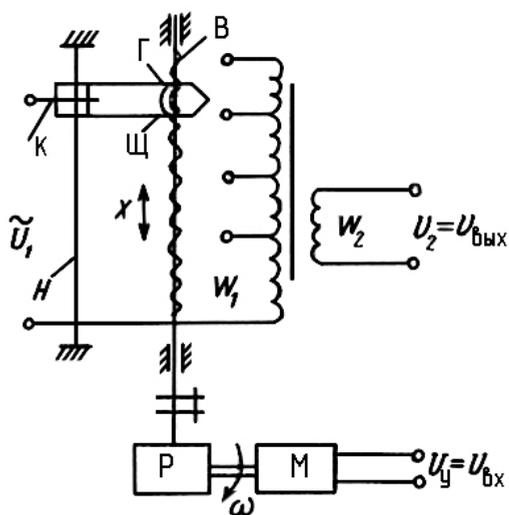


Рис. 3.92. Функциональная схема однофазного регулируемого трансформатора

Регулирование выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , равного напряжению  $U_2$  на вторичной обмотке трансформатора, осуществляется посредством щетки (Щ), скользящей по выводам секций трансформатора. Щетка расположена на консоли (К), опирающейся с одной стороны на вертикальную направляющую (Н), а с другой – на гайку (Г). Гайка (Г) и вертикально расположенный винт (В) образуют винтовую пару, преобразующую вращательное движение выходного вала редуктора (Р) в поступательное движение  $x$  щетки (Щ). Входной вал редуктора (Р) приводится во вращение со скоростью  $\omega$  асинхронным двигателем (М). Напряжение управления двигателем  $U_y$  является входным напряжением  $U_{\text{вх}}$  всего устройства.

Как элемент системы регулирования напряжения рассматриваемый трансформатор характеризуется существенными отличиями в сравнении с другими видами регуляторов напряжения. Эти отличия обусловлены способом управления выходным напряжением. При подаче на двигатель (М) напряжения управления  $U_{\text{вх}}$ , величина которого не изменяется, входной вал редуктора (Р) будет вращаться с постоянной скоростью  $\omega = \text{const}$ . Механизм при этом обеспечивает перемещение щетки (Щ), которое определяется выражением

$$x = k_{\text{п}} \int \omega dt, \quad (3.117)$$

где  $k_n$  – коэффициент передачи механизма, состоящего из редуктора (Р) и винтовой передачи. Перемещение щетки (Щ) приведет к равномерному переключению секций трансформатора и, следовательно, к изменению выходного напряжения в соответствии с выражением

$$U_{\text{вых}} = \left( \frac{U_1}{k_T} \right) k_n \int \omega dt, \quad (3.118)$$

где  $k_T = U_1/U_2 = w_1/w_2$  – коэффициент трансформации. Отсюда следует, что выходное напряжение регулируемого трансформатора определяется как интеграл от скорости вращения двигателя (М), т.е. является интегрирующим (*а статическим*) элементом и не имеет статической характеристики. При вращении двигателя (М) с постоянной скоростью выходное напряжение будет увеличиваться или уменьшаться до тех пор, пока щетка не достигнет крайнего положения.

Переключение ступеней напряжения трансформатора происходит дискретно от одной ступени к другой с остановкой привода на каждой ступени. Время переключения трансформатора составляет около 1 с. *Особенность характеристик регулируемого трансформатора следует иметь в виду при проектировании системы управления режимом работы печи.*

**Регуляторы симметрирования.** Как уже отмечалось выше, плавильные печи промышленной частоты выполняются *тигельными* и *канальными*. В тигельных печах используется *однофазный индуктор*, который для используемой трехфазной питающей сети является *однофазной нагрузкой*. Учитывая, что мощности плавильных печей промышленной частоты весьма значительны и достигают десятков МВА, их подключение к трехфазной сети недопустимо, так как приводит к несимметричной нагрузке питающего трансформатора. Поэтому для равномерного распределения однофазной нагрузки на три фазы используют так называемые *симметрирующие* устройства. Симметрирующие устройства выполняются как *регулируемыми*, так и *нерегулируемыми*.

Если эквивалентное сопротивление индуктора в процессе плавки изменяется незначительно, то используют нерегулируемые схемы симметрирующих устройств. Наибольшее распространение в промышленности получила схема Штейнмеца, показанная на рис. 3.93. Нагрузкой симметрирующего устройства, состоящего из конденсатора  $C$  и дросселя  $L$ , является индуктор, представленный активным сопротивлением  $R_n$  и индуктивностью  $L_n$ . Полное симметрирование токов  $I_A, I_B, I_C$  в схеме рис. 3.93 обеспечивается при активной нагрузке и выполнении соотношения токов  $I_n / \sqrt{3} = I_L = I_C$ . Для выполнения этого условия однофазная активно-индуктивная нагрузка (активное сопротивление  $R_n$  и индуктивность  $L_n$ ), которой является индуктор, должна быть *скомпенсирована путем введения компенсирующего конденсатора  $C_k$* . При активно-индуктивной нагрузке ухудшается коэффициент мощности трехфазной сети.

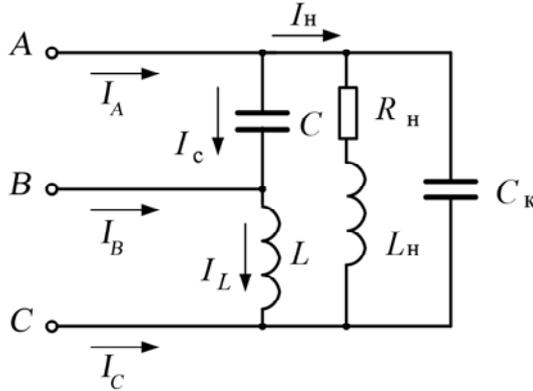


Рис. 3.93. Симметрирующая схема Штейнца

В случае, если значения  $R_n$  и  $L_n$  в ходе плавки изменяются в широких пределах, то в систему управления вводят *регулятор симметрирования*, который автоматически регулирует параметры симметрирующего устройства, обеспечивая равномерную нагрузку по фазам трансформатора. При этом, несмотря на кажущуюся простоту схемы симметрирования, предложенной Штейнцем, ее практическое использование при однофазной нагрузке большой мощности с изменяющимися параметрами, что характерно для установок индукционного нагрева и плавки, связано со значительной стоимостью и сложностью, так как возникает необходимость регулирования значений емкости и индуктивности реактивных сопротивлений. Рекомендуется устанавливать управляемое симметрирующее устройство на вторичной стороне, что потребует установки дорогостоящих контакторов, обладающих мощной дугогасительной камерой [29].

Схема с дросселем-делителем (рис. 3.94) позволяет симметрировать активно-индуктивную нагрузку, что делает ее предпочтительной для индукционных установок, имеющих всегда невысокий коэффициент мощности. Для этой схемы минимальная мощность всех реактивных элементов получается при угле сдвига фаз между напряжением и током равном  $30^\circ$ , а условия симметрирования нагрузки записываются в виде

$$X_{L1} = X_{L2} = X_C = X_M = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)R_n, \quad (3.119)$$

где  $R_n$  – активное сопротивление нагрузки в параллельной схеме замещения индуктора;  $X_M$  – сопротивление взаимной индуктивности плеч дросселя.

При изменении параметров нагрузки ( $R_n$ ,  $L_n$ ,  $C_k$ ) в симметрирующих устройствах, выполненных по схемам рис. 3.93 и 3.94, необходимо также изменять, как емкость конденсаторной батареи  $C$ , так и индуктивность дросселя  $L$ . Управляемые симметрирующие устройства с дросселем-делителем широко используются в промышленных плавильных печах.

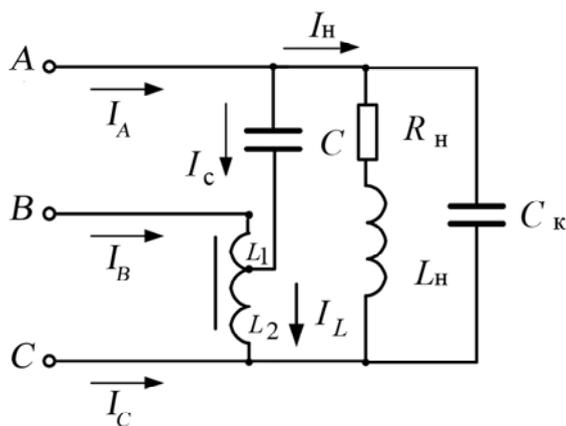


Рис. 3.94. Симметрирующая схема с дросселем-делителем

Для питания нагревательных индукционных установок промышленной частоты используют тиристорные регуляторы напряжения, аналогичные регуляторам напряжения для питания электрических печей сопротивления (см. раздел 2.11).

Электропитание индукционных установок повышенной частоты осуществляется от преобразователей частоты, которые преобразуют напряжение питающей сети, равное 50 Гц, в напряжение частотой (0,5–100 кГц и выше), поступающее на индуктор. В настоящее время для преобразования частоты 50 Гц в повышенную частоту используют *тиристорные и транзисторные преобразователи*.

**Тиристорные преобразователи пониженной частоты**, также называемые *преобразователями с непосредственной связью питающей сети и нагрузки*, используются для питания индукционных нагревательных установок пониженной (ниже частоты питающей сети). Пониженную частоту (8–12 Гц) в индукционных нагревателях применяют для увеличения глубины проникновения при нагреве крупных заготовок.

Преобразователи частоты с непосредственной связью (рис. 3.95, а) строятся на основе реверсивных преобразователей постоянного тока (управляемых выпрямителей). В этих преобразователях выпрямление переменного напряжения источника питания  $U$  частотой  $f_1$  и преобразование этого выпрямленного напряжения в переменное с частотой  $f_2 \neq f_1$  совмещено в одном устройстве, что и определило их название. При этом происходит однократное преобразование, что обуславливает высокий КПД и хорошие массогабаритные показатели.

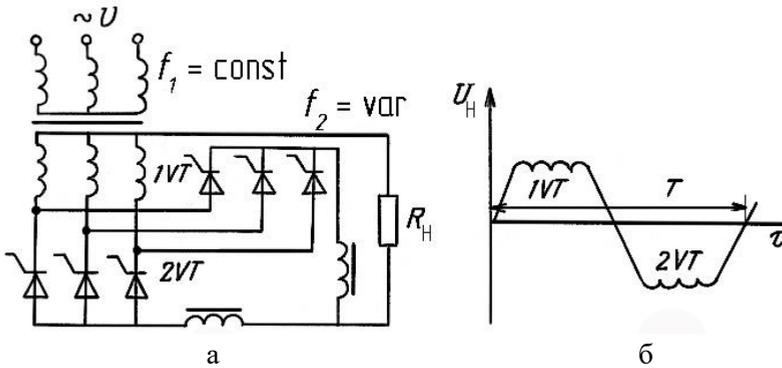


Рис. 3.95. Схема (а) и диаграмма выходного напряжения (б) преобразователя частоты с непосредственной связью

Принцип работы преобразователя с непосредственной связью заключается в подключении нагрузки  $R_H$  к источнику переменного напряжения  $U$  через две встречновключенные группы тиристоров  $1VT$  и  $2VT$ , каждая из которых периодически открывается на время, равное половине периода  $T$  выходного напряжения  $U_H$  (см. рис. 3.95 б). Такой режим работы обеспечивается у любого реверсивного преобразователя постоянного тока при подаче на вход управления периодического знакопеременного напряжения. Изменение амплитуды и частоты сигнала управления позволяет регулировать независимо друг от друга амплитуду и частоту выходного переменного напряжения. Огибающая кривой выходного напряжения  $U_H$  формируется из участков питающего напряжения.

Преобразователь частоты, показанный на рис. 3.95 а, выполнен по нулевой схеме. Рассмотренный выше принцип действия и характер временных диаграмм преобразователя сохраняется и при использовании мостовых схем.

При рассмотрении статических и динамических характеристик преобразователя частоты следует иметь в виду, что кроме выходного напряжения основной частоты, определяемой периодом  $T$ , он вырабатывает и гармонические составляющие более высоких частот (рис. 3.95 б). Высшие гармонические составляющие выходного напряжения преобразователя могут оказывать вредное воздействие на нагрузку. Для уменьшения их влияния последовательно с нагрузкой так же, как и в преобразователях постоянного тока, включают сглаживающие дроссели. Приведенное выше ограничение по выходной частоте преобразователя с непосредственной связью упрощает задачу снижения влияния высших гармонических составляющих напряжения на нагрузку.

**Для питания индукционных установок повышенной частоты используют преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока, получившим также название преобразователей с автономным инвертором.** Такие преобразователи выполняются на *тиристорах и транзисторах*. В них использу-

ется двукратное преобразование энергии: сначала напряжение питающей сети выпрямляется выпрямителем (В), а затем постоянное напряжение с помощью инвертора (И) преобразуется в переменное, как это показано на рис. 3.96. Между выпрямителем и инвертором обычно включается фильтр (Ф), сглаживающий пульсации выпрямленного напряжения. Выпрямители в преобразователях частоты выполняются по нулевым или мостовым схемам преобразователей постоянного тока.

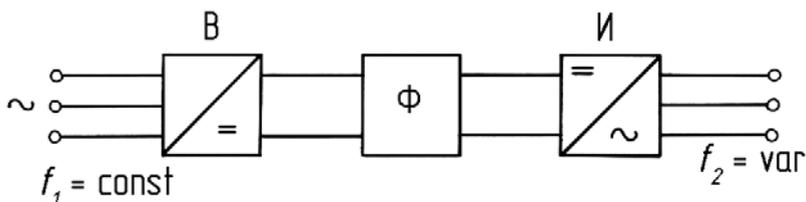


Рис. 3.96. Функциональная схема преобразователя частоты с автономным инвертором

В зависимости от числа фаз выходного напряжения преобразователи частоты делят на одно- и многофазные (как правило, трехфазные). Для питания индукционных установок чаще всего используют однофазные преобразователи частоты. Основным достоинством преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока является возможность получения с помощью автономного инвертора практически любой (ограниченной только инерционными свойствами ключевых элементов – тиристоров, транзисторов) изменяемой в широких пределах частоты  $f_2$ , не зависящей от частоты питающего напряжения.

Основой преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока является *инвертор* (И). Инвертор, работающий на автономную нагрузку, не содержащую источников энергии той же частоты, что и выходная частота инвертора, называют *автономным*. Частота и форма кривой выходного напряжения автономного инвертора определяются режимом работы ключевых элементов.

*В автономных инверторах, построенных на тиристорах, используется принудительная коммутация тиристоров с помощью специальных коммутационных схем, содержащих конденсаторы.*

Автономный инвертор по существу является коммутатором, поочередно подключающим нагрузку к положительному и отрицательному полюсам источника питания постоянного тока. На рисунке 3.97 а приведена схема инвертора, а на рис. 3.97, б – диаграммы напряжений, поясняющие принцип принудительной коммутации тиристоров. При включенных тиристорах  $VT1$ ,  $VT2$  к нагрузке  $R_n$  приложено положительное напряжение  $U_n$  (см. рис. 3.97 б), а напряжение  $U_T$  на тиристорах  $VT1$ ,  $VT2$  равно  $\Delta U \approx 0$ . Включение в момент времени  $t_1$  тиристоров

$VT3$ ,  $VT4$  (предварительно с тиристоров  $VT1$ ,  $VT2$  снимают управляющие импульсы, что не приводит к их отключению из-за неполной управляемости) вызывает изменение знака напряжения  $U_T$  на включенных тиристорах  $VT1$ ,  $VT2$ , так как предварительно заряженный конденсатор  $C$  (полярность его указана на схеме рис. 3.97 а) при включении тиристоров  $VT3$ ,  $VT4$  оказывается подключенным к тиристорам  $VT1$ ,  $VT2$  с обратной полярностью. Отрицательное напряжение, приложенное к тиристорам  $VT1$ ,  $VT2$ , приводит к их запирающему. Далее рассмотренный процесс повторяется на каждом периоде коммутации тиристоров.

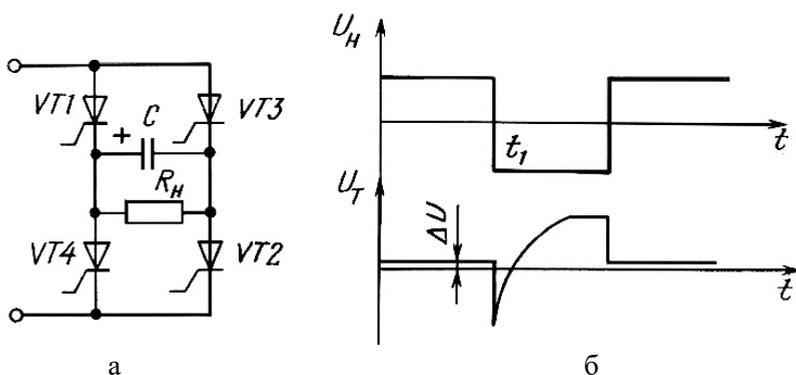


Рис. 3.97. Схема (а) и диаграмма напряжений (б) тиристорного автономного инвертора

Для питания индукционных установок повышенной частотой выпускаются однофазные тиристорные преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, охватывающие диапазон мощностей от 160 до 3200 кВт, частот от 0,5 до 8 кГц, напряжений на выходе от 400 до 800 В. Питание тиристорных преобразователей частоты осуществляется от сети 380 В или от индивидуальных силовых (печных) трансформаторов с первичным напряжением 6 и 10 кВ. Номинальный КПД преобразователей составляет 90–92 %.

**Транзисторные преобразователи частоты** относятся к классу преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Их широкое применение в настоящее время обусловлено разработкой мощных полевых транзисторов и транзисторов типа IGBT, у которых рабочее напряжение достигает 1500–2000 В, ток – 100–250 А, рабочая частота – 20 кГц и выше, а коэффициент передачи по току, в отличие от биполярных транзисторов, стремится к бесконечности. Указанные параметры транзисторов позволяют строить преобразователи частоты, массогабаритные показатели которых значительно превосходят показатели тиристорных преобразователей при меньшей стоимости. Транзисторные преобразователи частоты также, как и тиристорные, выпускаются в однофазном и трехфазном исполнении.

Для транзисторных преобразователей частоты получила распространение более простая, в сравнении с тиристорными, силовая схема с неуправляемым выпрямителем (рис. 3.98). В то же время в ряде случаев используют и управляемый тиристорный выпрямитель. В схеме рис. 3.98 транзисторный автономный инвертор выполнен по мостовой схеме. На выходе неуправляемого диодного выпрямителя обязательно устанавливается накопительный конденсатор  $C_{\phi}$ , который выполняет в транзисторном преобразователе две функции – сглаживает пульсации выпрямленного напряжения и обеспечивает накопление и возврат реактивной энергии, протекающей в контуре постоянного тока при коммутации индуктивной нагрузки. Принцип действия транзисторного преобразователя частоты аналогичен принципу действия тиристорного преобразователя. Транзисторы  $VT1 \dots VT4$  выполняют роль ключей, управляемых системой управления СУИ, имеющей при раздельном управлении каналами напряжения и частоты два входа:  $U_{y1}$  – для регулирования напряжения и  $U_{y2}$  – для регулирования частоты.

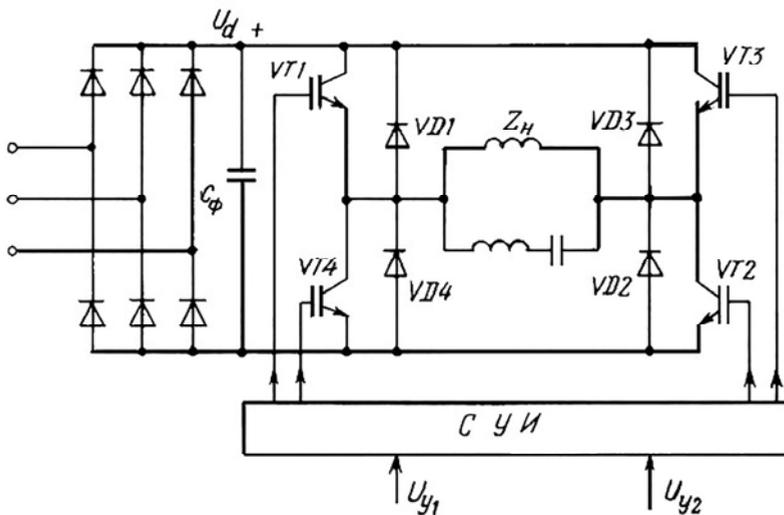


Рис. 3.98. Схема однофазного транзисторного преобразователя частоты

При согласованном управлении обоими каналами система управления снабжается одним входом, а разделение функций управления напряжением и частотой осуществляется программным путем в микропроцессорном контроллере, который наряду с управлением транзисторами выполняет такие функции, как защита транзисторов от перегрузки по току и напряжению. Обратный мост на диодах  $VD1 \dots VD4$  обеспечивает пропускание обратного тока, протекающего в преобразователе при коммутации транзисторов. Как правило, указанные выше транзисторы выпускаются со встроенными обратными диодами, что упрощает конструкцию преобразователя.

Транзисторы (как и тиристоры) не могут работать на чисто емкостную нагрузку, так как неограниченный зарядный ток конденсатора, протекающий при открывании транзистора, выведет его из строя. Поэтому конденсаторы, используемые в индукционных установках для повышения коэффициента мощности, необходимо включать последовательно с дросселями, как это показано на рис. 3.98.

Использование неуправляемого выпрямителя, у которого выпрямленное напряжение  $U_d$  постоянно, является препятствием для регулирования выходного напряжения инвертора. Для сравнения отметим, что в тиристорном преобразователе частоты регулирование выходного напряжения инвертора обеспечивается изменением выпрямленного напряжения выпрямителя, т.е. у тиристорного преобразователя  $U_d = \text{var}$ . Для регулирования выходного напряжения инвертора при  $U_d = \text{const}$  используют импульсные методы. Наиболее распространенным методом импульсного регулирования действующего значения переменного напряжения является изменение длительности проводящего состояния транзистора в каждом полупериоде. Временные диаграммы на рис. 3.99 поясняют принцип импульсного регулирования выходного напряжения преобразователя частоты. Поскольку транзисторы являются полностью управляемыми ключами, то их моменты включения и отключения можно изменять с помощью системы управления. Варьируя длительность проводящего состояния транзистора, можно регулировать действующее значение выходного напряжения, которое определяется выражением

$$U_n = U_d \sqrt{2} \cdot t_u / T, \quad (3.120)$$

где  $t_u$  – длительность проводящего состояния транзистора;  $T$  – период выходного напряжения;  $U_n$  – действующее значение выходного напряжения (напряжения на нагрузке).

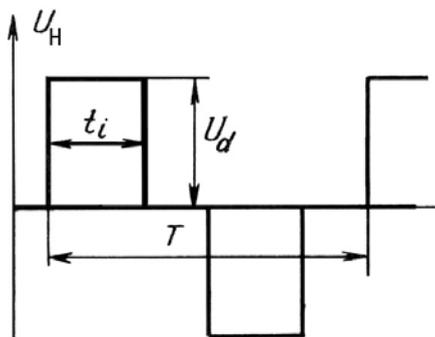


Рис. 3.99. К принципу импульсного регулирования напряжения

При низкой выходной частоте для регулирования действующего значения напряжения на нагрузке используют широтно-импульсное регулирование. При высокой частоте выходного напряжения, соизмеримой с частотными свойствами транзисторов, используют времяимпульсный способ регулирования, как показано на диаграмме рис. 3.99, т.е. в каждом полупериоде выходного напряжения осуществляют однократное переключение транзистора, варьируя время проводящего состояния транзистора.

Импульсные способы регулирования напряжения просты и эффективны, но у них есть недостаток, который заключается в том, что пропорционально изменению действующего значения напряжения изменяется и гармонический состав кривой напряжения. Следует заметить, что применительно к индукционным установкам изменение гармонического состава кривой напряжения на индукторе не ухудшает КПД преобразователя, поскольку в теплоту преобразуется напряжение любой частоты.

### 3.13. Системы управления индукционными печами и нагревательными установками

**Системы управления индукционными установками (ИУ)** по выполняемым технологическим задачам принято разделять на два класса:

- системы управления *плавильными* печами;
- системы управления *нагревательными индукционными установками*.

В свою очередь системы управления плавильными ИУ по частоте источника питания можно разделить на:

- системы управления установками промышленной частоты  $f = 50$  Гц;
- системы управления установками средней частоты  $f = 500 - 100\,000$  Гц;
- системы управления установками высокой частоты  $f = 100 - 300$  МГц;
- системы управления установками сверхвысокой частоты  $f \geq 0,3$  ГГц.

Современные системы управления всеми указанными видами ИУ строятся по типовой функциональной схеме (рис. 3.100), включающей в себя программируемый микропроцессорный контроллер МПК, исполнительный элемент (регулируемый преобразователь частоты или напряжения) ИЭ, объект управления (индукционная установка) и датчик обратной связи ДЭС, контролирующей регулируемую величину. Регулируемая величина и, соответственно, датчик обратной связи изменяются в зависимости от вида установки и выполняемых ею технологических задач. Системы управления конкретными ИУ имеют общую структуру (см. рис. 3.100), но отличаются алгоритмом управления, типом исполнительного элемента и датчика обратной связи. Особенностью современных систем управления является организация в структуре МПК устройств связи с системой верхнего уровня. Такое построение системы комплексного управления позволяет

программным путем вводить задание регулируемой величины не только непосредственно оператором, но и промышленным компьютером, управляющим всем технологическим процессом [30].

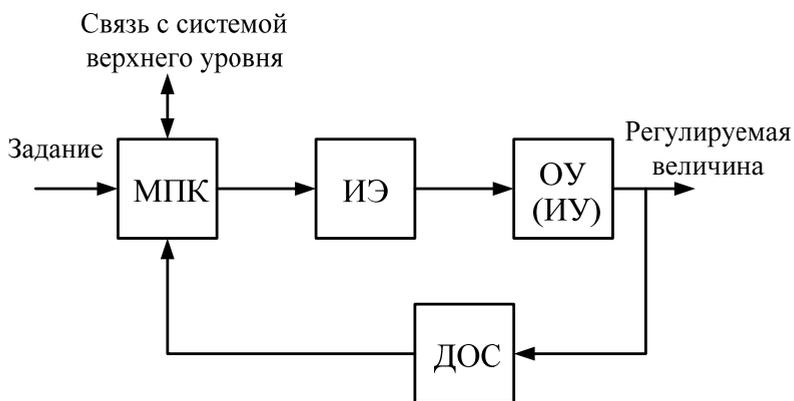


Рис. 3.100. Функциональная схема типовой системы автоматического управления ИУ

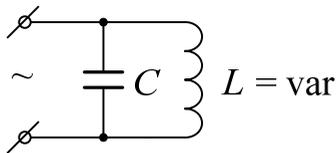
Рассмотрим принципы построения систем управления для каждого из указанных видов ИУ.

**Системы управления индукционными печами промышленной частоты** с точки зрения решаемых задач и конструктивных особенностей принято делить на системы управления *тигельными* и *канальными* печами. Главной задачей систем управления плавильными печами любого типа является обеспечение максимальной производительности печи, т.е. достижение минимального времени плавки при минимальных энергетических затратах.

*Индукционная установка как объект управления* может быть представлена в виде схемы колебательного контура рис. 3.101, у которого в процессе плавки изменяется активное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  в пределах:  $R$  – в 1,1–2,0 раза;  $L$  – в 1,5–2,0 раза. Отсюда следует, что для достижения заданной цели управления – обеспечения максимальной производительности печи необходимо регулировать вводимую в печь мощность. Эту задачу решает *регулятор мощности*, исполнительным элементом которого служит регулятор напряжения. Как отмечалось в разделе 3.12, в качестве исполнительного элемента в таком регуляторе используется *регулируемый печной трансформатор*.

В процессе плавки изменяется и *коэффициент мощности нагрузки*, что приводит к необходимости его регулирования путем изменения емкости конденсатора  $C$  (см. рис. 3.101). Поскольку собственный коэффициент мощности индуктора мал (лежит в пределах 0,05–0,2), то для обеспечения более эффективной загрузки трансформатора и снижения его установленной мощности необходимо

поддерживать коэффициент мощности нагрузки близким к единице. Учитывая, что параметры нагрузки в процессе плавки изменяются, в систему управления индукционной плавильной тигельной печью необходимо вводить *автоматический регулятор коэффициента мощности*.



**Рис. 3.101.** Схема замещения индукционной плавильной установки

*Системы управления тигельными печами промышленной частоты обеспечивают поддержание вводимой в печь мощности, стабилизацию коэффициента мощности и автоматическое симметрирование нагрузки* (рис. 3.102). До недавнего времени такие регуляторы конструктивно реализовывались в виде отдельных блоков, каждый из которых выполнял одну функцию управления [31]. В настоящее время системы управления индукционными плавильными установками реализуются на базе промышленных компьютеров и программируемых микропроцессорных контроллеров. Однако функциональная схема системы (рис. 3.102) и алгоритмы управления отдельными регуляторами не претерпели изменений. Система состоит из трех автономных регуляторов: *автоматического регулятора симметрирования АРИС, автоматического регулятора мощности АРИР и автоматического регулятора коэффициента мощности АРИК*. В настоящее время они реализуются на базе программируемых микропроцессорных контроллеров, образующих в совокупности с промышленным компьютером систему комплексного управления.

*Регулятор симметрирования АРИС* включает в себя реактор  $L$ , некоммутируемый конденсатор  $CS_0$  и переключаемые группы конденсаторов  $CS_1$  и  $CS_2$ . Управление контакторами  $KS_1$  и  $KS_2$  симметрирующего устройства осуществляется по сигналам датчика симметрии (ДС) переключающим устройством (ПУ).

*Регулятор мощности АРИР* состоит из блока управления переключением ступеней напряжения трансформатора РПН, управляемого по наибольшему из сигналов – по току или напряжению нагрузочного контура.

*Регулятор АРИК* управляет переключением ступеней емкости конденсаторов и контакторами  $K_1 - K_N$ , обеспечивая поддержание коэффициента мощности ИУ, близким к единице. Наибольшее распространение получила схема ступенчатого изменения емкости конденсаторной батареи, приведенная на рис. 3.102. Однако она обладает низким быстродействием и реализуется на базе контакторов, переключающих группы конденсаторов.



*Системы управления канальными плавильными печами*, работающими на промышленной частоте можно рассматривать как частный случай системы управления тигельными печами. Действительно, системы управления канальными печами снабжаются только регуляторами напряжения (мощности). Это обусловлено тем, что вопросы симметрирования и регулирования коэффициента мощности при управлении канальными печами решаются в основном *конструктивными* методами. Задача *симметрирования* нагрузки решается путем выбора числа *индукционных единиц* кратным числу фаз питающей сети. Регулятор коэффициента мощности для канальных печей не применяют, поскольку параметры индуктора (индукционной единицы) в процессе плавки остаются неизменными (см. раздел 3.9).

*Системы управления тигельными плавильными печами повышенной частоты* строятся аналогично системам управления печами промышленной частоты, но имеют некоторые отличия. Поскольку для питания индуктора используется преобразователь частоты, в котором «автоматически» решаются вопросы согласования однофазной нагрузки, то регулятор симметрирования отсутствует. Сохраняется *регулятор напряжения* (мощности), регулятор *коэффициента мощности и согласования нагрузки*. Включение в систему управления тигельной плавильной печью регулятора согласования нагрузки обусловлено необходимостью обеспечения полной загрузки преобразователя частоты при изменении параметров индуктора. Для согласования нагрузки выполняют индуктор «с отпайками», т.е. используют изменение числа витков индуктора, или применяют промежуточные *согласующие трансформаторы*.

При использовании для питания индукционных тигельных печей тиристорных и транзисторных преобразователей появляется возможность решать вопросы согласования нагрузки путем регулирования *частоты напряжения* на индукторе. Как известно, активное и индуктивное сопротивление индуктора зависит от частоты. Использование для согласования нагрузки регулирования частоты позволяет существенно упростить как индуктор за счет исключения «отпаек», так и систему управления за счет исключения дополнительных согласующих трансформаторов и коммутирующей аппаратуры.

*Системы управления индукционными нагревательными установками* (ИНУ) можно разделить на три типа. Одной особенностью ИНУ является то, что они относятся к объектам с распределенными параметрами, а система характеризуется ограниченной управляемостью. Выходными величинами объекта являются параметры температурного поля в загрузке, а входной (в большинстве случаев) – передаваемая в загрузку активная мощность. В этой системе практически невозможно управлять распределением источников тепла по объему нагреваемой заготовки. Вторая особенность обусловлена недоступностью измерения темпера-

туры, неравномерностью нагрева и быстротечностью процесса нагрева. Указанные особенности индукционного нагрева определили три типа систем управления ИНУ:

1) *системы управления электрическим режимом*, обеспечивающие стабилизацию одного или нескольких электрических величин (напряжения, тока, мощности), т.е. системы разомкнутые по температуре объекта управления;

2) *замкнутые системы управления температурой изделия* в одной или нескольких точках нагреваемого объекта;

3) *замкнутые системы*, в которых сигнал обратной связи вычисляется с помощью модели объекта.

Первый тип систем применяется при отсутствии возмущающих воздействий и эффективен при крупносерийном и массовом производстве. Простой и наиболее распространенной разомкнутой по температуре системой регулирования является система стабилизации напряжения индуктора. При необходимости получения нужной динамики роста температуры можно использовать программные регуляторы электрического режима. Нужную программу изменения параметра подбирают по результатам математического или физического моделирования.

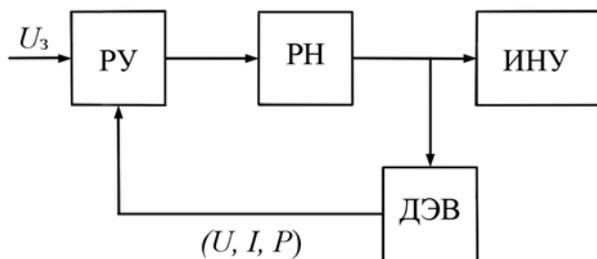
В нестационарных режимах работы нагревателя имеют место значительные возмущения теплового режима, которые не отрабатываются разомкнутыми по температуре системами управления. Замкнутые по температуре САУ (системы второго типа) снижают или исключают выдачу некачественно нагретых заготовок, тем самым уменьшают средний удельный расход энергии на нагрев и повышают сменную производительность установки.

Точность регулирования теплового режима возрастает с ростом количества точек, информация о температуре которых используется при выработке управляющего воздействия. Из-за ограниченности наблюдения здесь особенно важно знать зависимость между температурами наблюдаемых и ненаблюдаемых точек по объему заготовки. Эти зависимости можно получить из математических моделей процесса.

Невозможность непосредственного получения информации о температуре точек, характеризующих состояние нагреваемого объекта, привела к созданию *систем с использованием моделей*. В таких системах параллельно тепловому процессу производится моделирование его в реальном времени. Точность регулирования зависит как от адекватности модели, так и от количества точек, температура в которых вычисляется.

Функциональная схема системы управления электрическим режимом ИНУ (рис. 3.104) по существу аналогична системе регулирования температуры электрической печи сопротивления. Она включает в себя регулирующее устрой-

ство (РУ), исполнительный элемент – регулятор напряжения (РН) и датчик обратной связи (ДЭВ), измеряющий одну из электрических величин: *напряжение на индукторе, ток индуктора или мощность, поступающую в индуктор*. Стабилизация электрического режима ИНУ обеспечивает повторяемость температурных условий при переходе от одного изделия к другому, если сохраняются конфигурация и масса нагреваемых изделий. В то же время изменение внешних условий такая система не отслеживает.



**Рис. 3.104. Функциональная схема системы управления электрическим режимом нагрева заготовки**

Более точной в условиях ограниченной управляемости, но и более сложной в реализации, является *система управления тепловым режимом нагрева заготовки*, приведенная на рис. 3.105. Система управления рис. 3.105 является *двухконтурной*, в которой внутренний контур представляет собой систему управления электрическим режимом, а внешний – температурным. Особенностью системы управления технологическим режимом нагрева в индукционной нагревательной установке является то, что внешний контур системы выступает в роли *датчика электрического режима* для внутреннего контура. Сложность непосредственного измерения таких технологических величин, как температура и распределение температуры, связана с неоднородностью нагрева изделий. Поэтому в настоящее время для управления температурным режимом нагрева в индукционных установках используют косвенные показатели, которые вычисляют по измеряемым величинам, или путем использования моделей – датчиков тепловых величин ДТВ объекта как отдельных, так и встраиваемых в систему управления.

Таковыми регуляторами, используемыми в системах управления плавильными установками, как регуляторы коэффициента мощности и регуляторы согласования нагрузки системы управления ИНУ, как правило, не снабжаются.

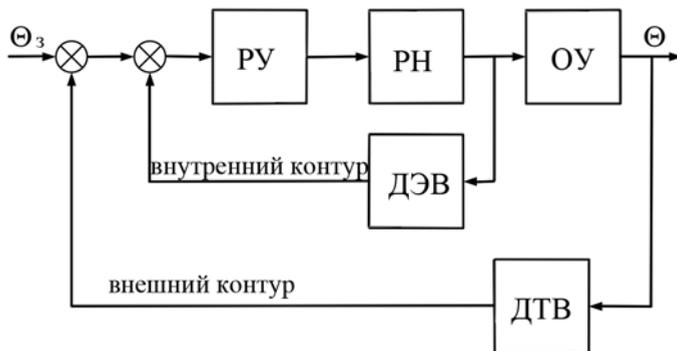


Рис. 3.105. Функциональная схема системы управления

### 3.14. Типовые задачи, возникающие при расчете и проектировании установок индукционного нагрева

#### 3.14.1. Электромагнитная задача расчета параметров цилиндрической системы «индуктор – нагрузка» в программе ELCUT

На рисунке 3.106 представлен эскиз цилиндрической системы «индуктор–нагрузка» (раздел 3.6.2) с размерами. Необходимо осуществить задачу расчета представленного на рисунке устройства индукционного нагрева с использованием среды ELCUT методом конечных элементов. Такую электромагнитную систему имеет множество различных устройств индукционного нагрева, использующихся для нагрева деталей под пластическую деформацию, термообработку и т.д. Решаемая задача является симметричной относительно оси вращения системы «индуктор–нагрузка», показанной на рис. 3.106 штрихпунктирной линией, а поэтому может быть сведена к двумерной осесимметричной задаче путем использования соответствующих граничных условий.

Решение электромагнитной задачи по условию должно соответствовать температуре нагрева нагрузки 1100 °С.

Исходные данные для расчета: ток индуктора  $I_1 = 300$  А, частота 66 кГц, количество витков индуктора – 3, материал индуктора – медь, материал нагрузки – сталь 45, свойства материалов индуктора при температуре 20°С (удельное электрическое сопротивление  $\rho = 1,93 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (удельная электрическая проводимость  $\sigma = 5,18 \cdot 10^7$  См/м), относительная магнитная проницаемость  $\mu = 1$ ) и нагрузки при температуре 1100 °С (удельное электрическое сопротивление  $\rho = 1 \cdot 10^{-5}$  Ом·м (удельная электрическая проводимость  $\sigma = 1 \cdot 10^5$  См/м), относительная магнитная проницаемость  $\mu = 1$ ).

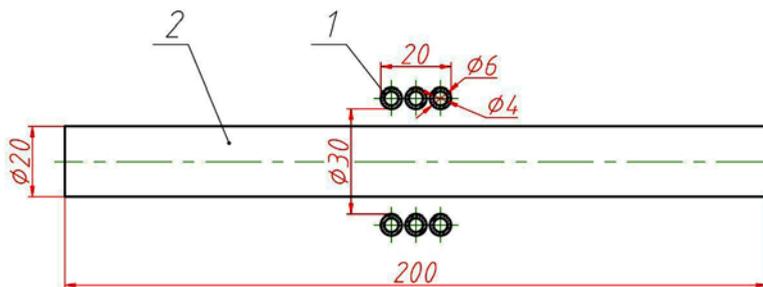
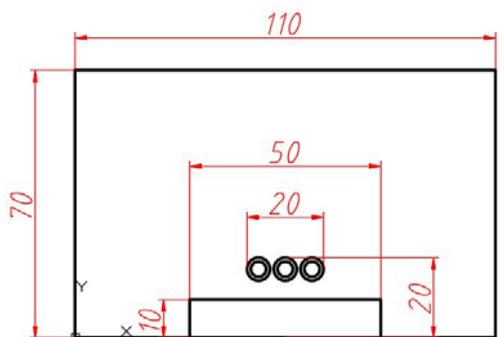
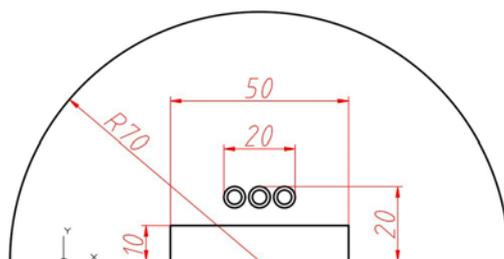


Рис. 3.106. Чертеж системы «индуктор–загрузка»

Учитывая, что решаемая задача является осесимметричной и воспользовавшись граничным условием симметрии для оси вращения электромагнитной системы, можно производить расчет для половины расчетной области. На рисунке 3.107 представлены варианты расчетная область цилиндрической (а) и сферической (б) формы с рекомендуемыми для расчета размерами. Представленная геометрическая модель представляет собой  $\frac{1}{2}$  поперечного сечения исследуемой электромагнитной системы.



а



б

Рис. 3.107. Размеры расчетной области для экспорта в ELCUT

Выбор конкретной формы внешней границы расчетной области определяется конфигурацией электромагнитного поля и в данном случае большого значения не имеет. Определяющее значение приобретают размеры принятой формы границы. Они должны быть выбраны исходя из того (рис. 3.107), что расстояние от наружной поверхности витков индуктора до внешней границы должно составлять 2–2,5 внутреннего радиуса индуктора, а расстояние от торцов загрузки влево и вправо до внешней границы – 1–1,5 внутреннего радиуса индуктора [32].

После создания в ELCUT геометрии исследуемой электромагнитной системы зададим электрофизические свойства используемых материалов. Следует отметить, что в ELCUT вместо привычного удельного электрического сопротивления задается значение удельной электрической проводимости. На рисунке 3.108 в качестве примера показано окно задания электрофизических свойств индуктора.

Для индуктора в качестве источника поля задаем полный ток. Следует иметь в виду, что в ELCUT необходимо задавать не действующее значение тока, а его амплитудное значение. Таким образом, зададим в нашей модели ток индуктора равным  $300 \cdot \sqrt{2}$  А для каждого витка индуктора, а также укажем, что витки соединены последовательно (рис. 3.108).

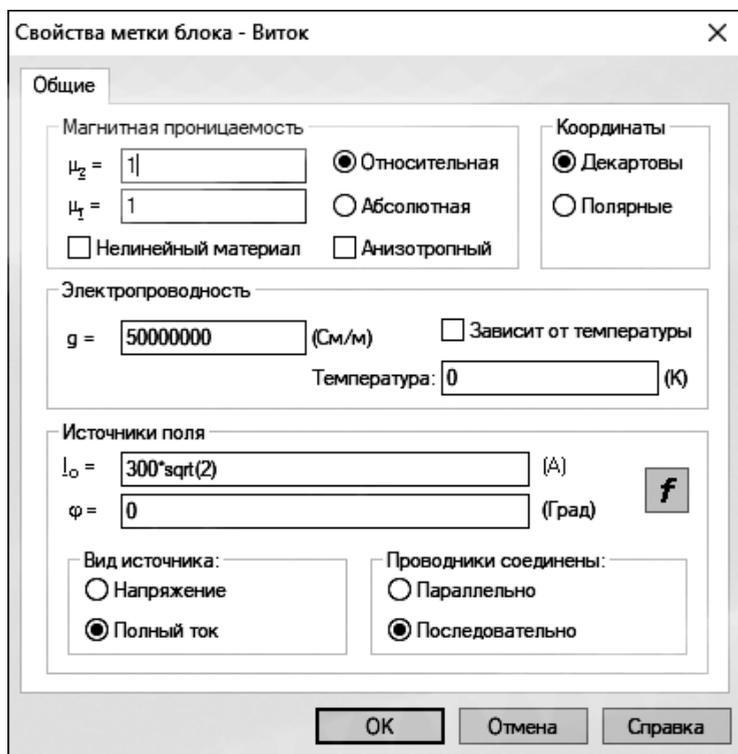
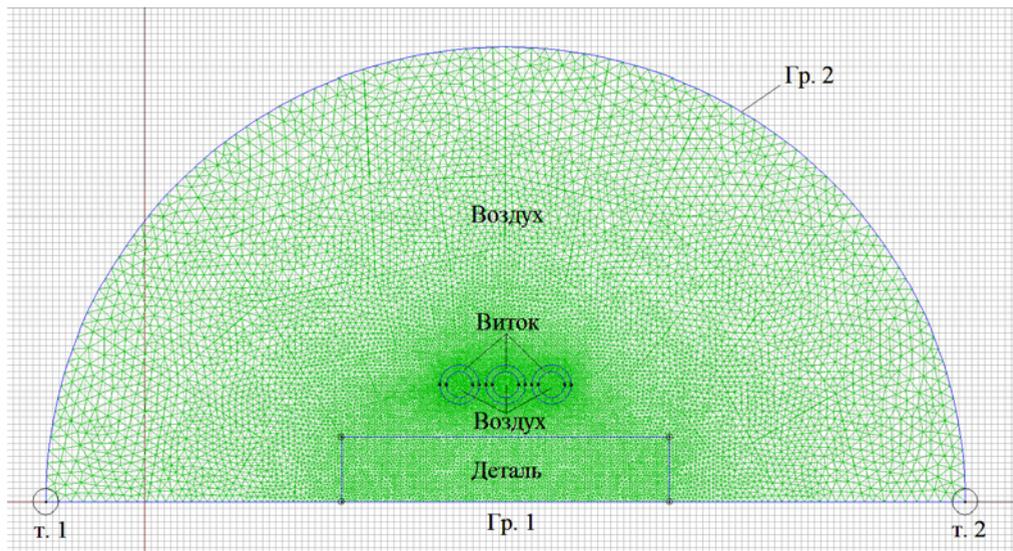


Рис. 3.108. Форма задания электрофизических свойств материала индуктора

На оси симметрии (граница 1 на рис. 3.109) задается граничное условие Неймана  $dH/dr = 0$  (отсутствие тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля), на внешней границе (граница 2) – нулевое граничное условие Дирихле  $A = 0$  (полагается равным нулю значение магнитного потенциала, т.е. поле локализовано в пределах расчетной области).



**Рис. 3.109.** Расчетная область с сеткой конечных элементов

Наложение на расчетную область сетки конечных элементов (3.109) осуществляется автоматически или вручную с использованием соответствующих команд ELCUT. Изменение размера симплекс-элементов сетки возможно в свойствах используемых в модели блоков («Деталь», «Виток», «Воздух»). Для создания неравномерной сетки, когда так же, как и в рассматриваемом случае, необходимо более точно рассчитать картину электромагнитного поля в индукторе, загрузке и воздушном зазоре между ними, следует добавить в геометрическую модель дополнительные точки (т. 1 и т. 2 на периферии расчетной области, где мелкая сетка не требуется), в которых задать более маленькое значение размера сетки по сравнению с блоками «Виток» и «Деталь».

На рис. 3.110 представлено распределение плотности тока в индукторе и загрузке, а на рис. 3.111 – распределение плотности тока по радиусу детали в центральном сечении по длине.

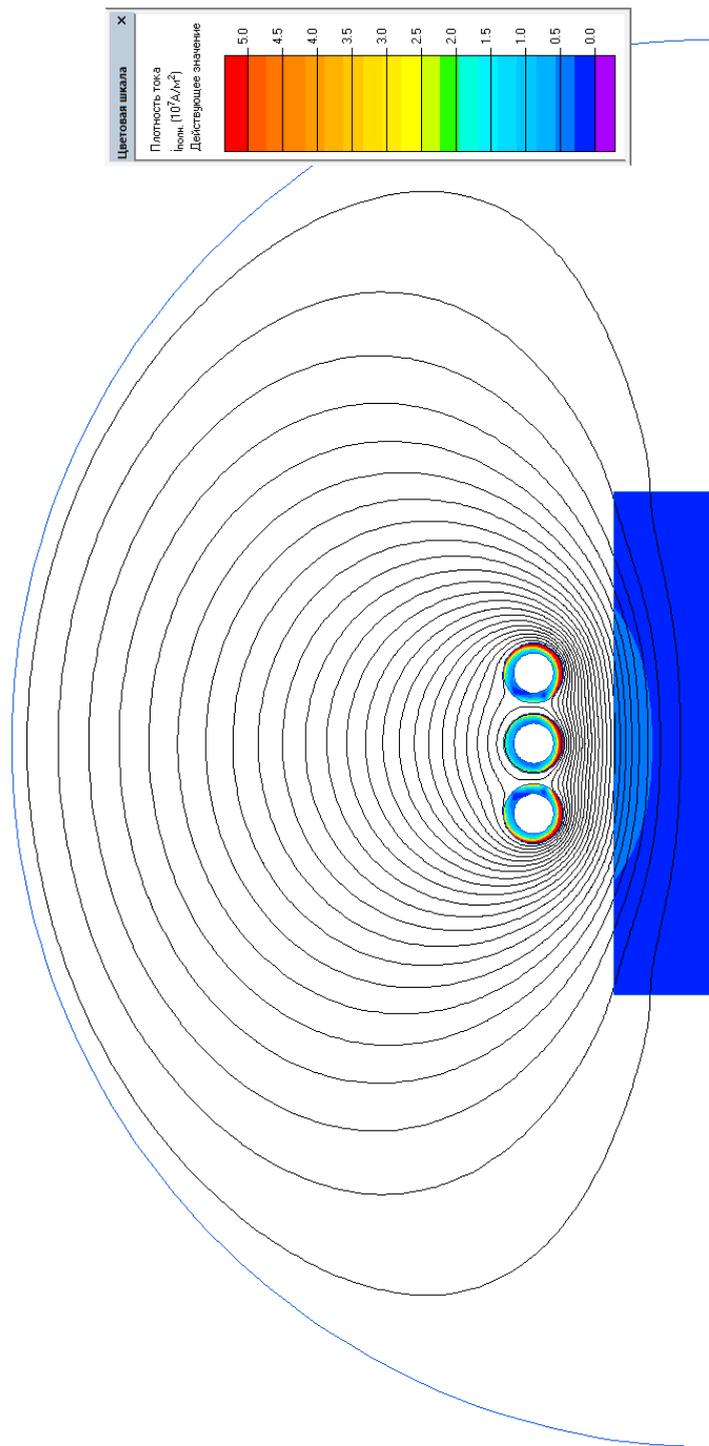


Рис. 3.110. Распределение плотности тока в индукторе и загрузке

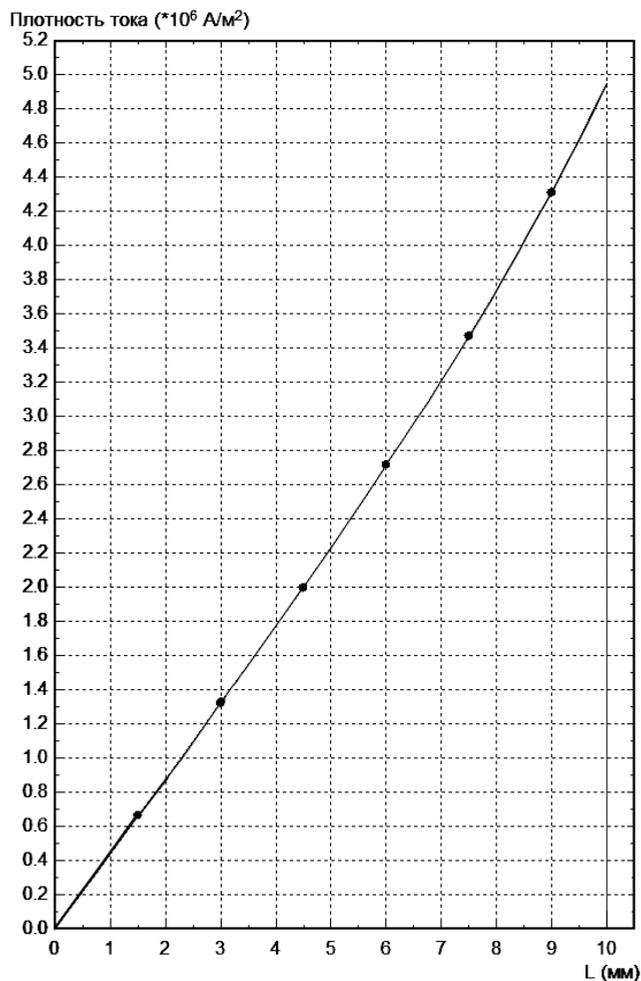


Рис. 3.111. Распределение плотности тока по радиусу детали

С использованием интегрального калькулятора ELCUT рассчитаем значения интегральных электрических и энергетических параметров для исследуемой системы «индуктор – нагрузка»: активная мощность в индукторе  $P_1 = 210$  Вт, активная мощность в нагрузке  $P_2 = 820$  Вт, напряжение на индукторе  $U_1 = 26,1$  В. Нужно помнить, что приведенное значение  $U_1$  получено делением результата из ELCUT на  $\sqrt{2}$ , поскольку программа выдает не действующее значение напряжения, а амплитудное.

Тогда суммарная активная мощность системы «индуктор–загрузка»

$$P = P_1 + P_2,$$
$$P = 210 + 820 = 1030 \text{ Вт.}$$

Электрический КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P},$$
$$\eta = \frac{820}{1030} = 0,8.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_1 \cdot I_1},$$
$$\cos \varphi = \frac{1030}{26,1 \cdot 300} = 0,13.$$

Модификацией решенной задачи является задача электрического расчета системы «индуктор – загрузка» в случае, когда на нагреваемую деталь предварительно нанесено проводящее покрытие (например, защитное), а индуктор используется для оплавления этого покрытия. Если исходные данные остаются неизменными, а электрофизические свойства материала покрытия при температуре оплавления  $1100^\circ\text{C}$  заданы (удельное электрическое сопротивление  $\rho = 2 \cdot 10^{-5}$  Ом·м, относительная магнитная проницаемость  $\mu = 1$ ), то этапы моделирования и обработки результатов абсолютно аналогичны рассмотренным выше. Отличием модели является только наличие блока «Покрытие» с соответствующими свойствами. Пусть толщина защитного покрытия составляет 2 мм.

На рисунке 3.112 представлено распределение плотности тока в индукторе, загрузке и покрытии, иллюстрирующее эффект индукционного нагрева двухслойного проводящего тела (см. раздел 3.7). Интегральные результаты расчета: активная мощность в индукторе  $P_1 = 207$  Вт, активная мощность в детали  $P_2 = 703$  Вт, мощность в покрытии  $P_{\text{п}} = 444$  Вт, суммарная активная мощность  $P = 1354$  Вт, напряжение на индукторе  $U_1 = 25,1$  В, электрический КПД  $\eta = 0,85$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,18$ .

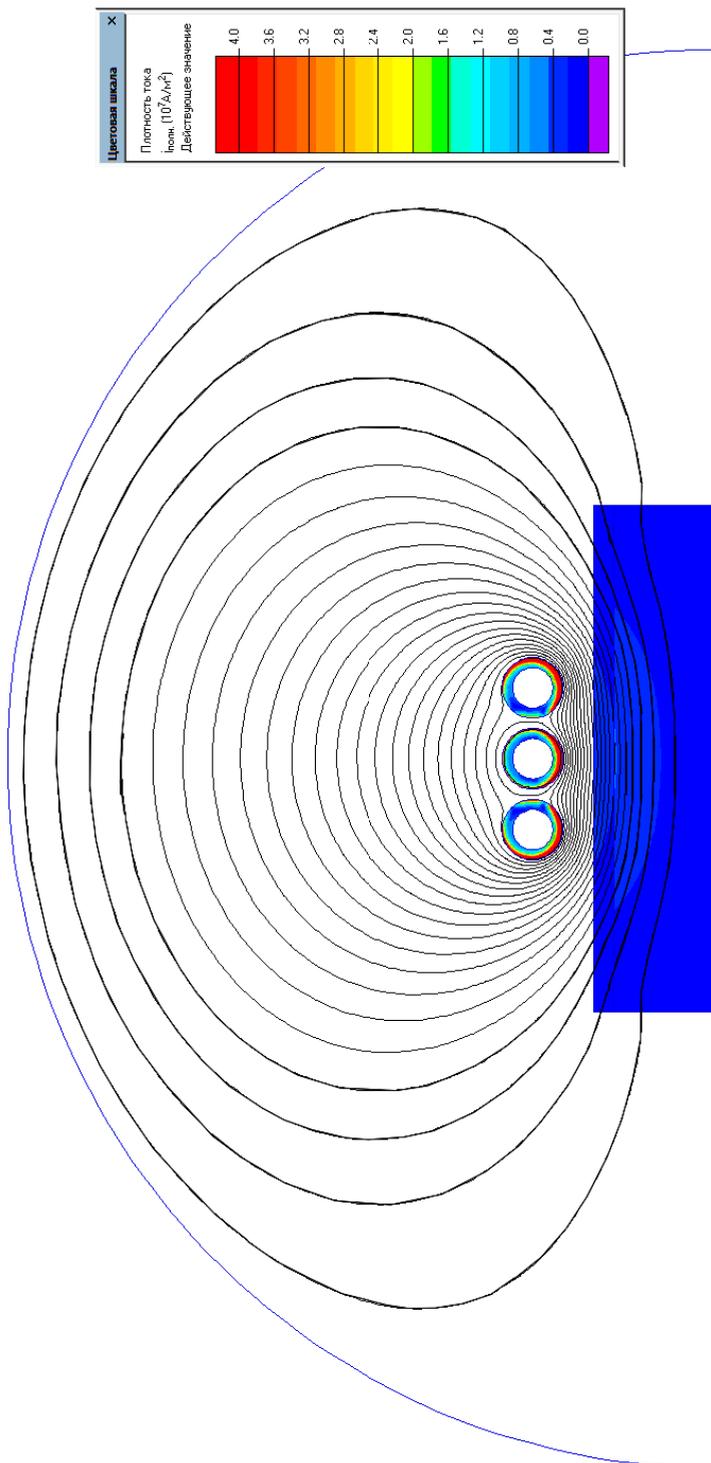


Рис. 3.112. Распределение плотности тока в индукторе, нагрузке и покрытии

### 3.14.2. Электромагнитная задача расчета параметров индукционно-резистивной стержневой системы в программе ELCUT

На рисунке 3.113 представлен эскиз индукционно-резистивной стержневой системы (разделы 3.6.2, 3.7.4) с размерами. В таких системах напряжение питания подается с одного конца между индуктором 1 и трубой 2, а на противоположном конце индуктор и труба электрически соединяются (рис. 3.113). Помимо индукционно-резистивных систем находят применение также индукционные и резистивные системы. Отличие индукционной системы от представленной на рис. 3.113 состоит в том, что электрическое соединение между индуктором и трубой отсутствует, а электропитание подается на оба конца индуктора. В резистивной же системе индуктор отсутствует вовсе, а напряжение питания приложено к трубе (подробнее см. разделы 3.7.4 и 3.10.2). Необходимо осуществить задачу расчета представленного на рисунке устройства с использованием среды ELCUT методом конечных элементов. Как правило, такие устройства используются для нагрева протяженных объектов, например, промышленных трубопроводов, поэтому расчет целесообразно проводить на 1 м длины устройства. Таким образом, решаемая задача является плоской двухмерной задачей.

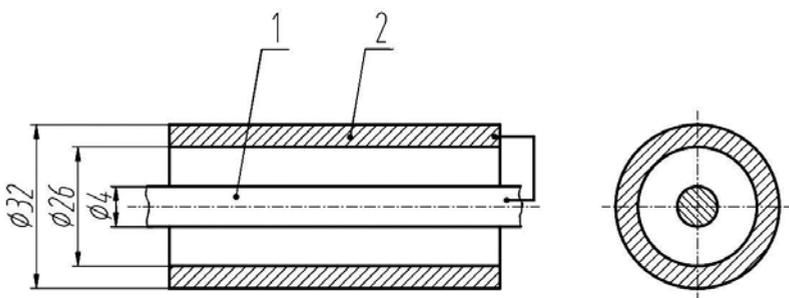
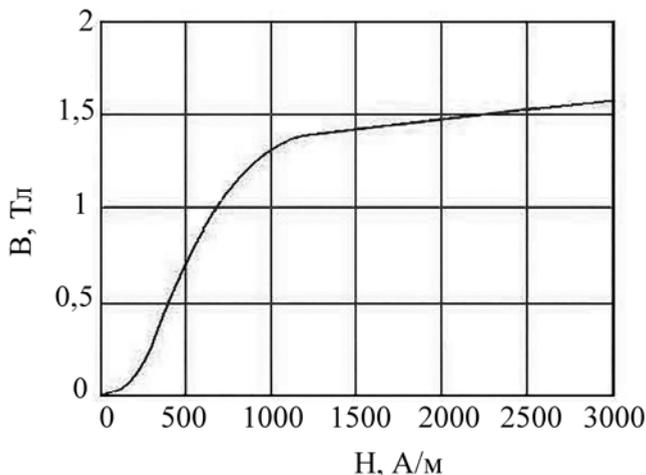


Рис. 3.113. Чертеж индукционной стержневой системы:  
1 – индуктор; 2 – загрузка (ферромагнитная труба)

Исходные данные для расчета: ток индуктора  $I = 100$  А, частота 50 Гц, сечение медного центрального проводника –  $12,6 \text{ мм}^2$ , внешний проводник – труба  $32 \times 3$  (сталь 10), свойства материалов индуктора (удельное электрическое сопротивление  $\rho = 1,93 \cdot 10^{-8}$  Ом·м (удельная электрическая проводимость  $\sigma = 5,18 \cdot 10^7$  См/м), относительная магнитная проницаемость  $\mu = 1$ ) и загрузки

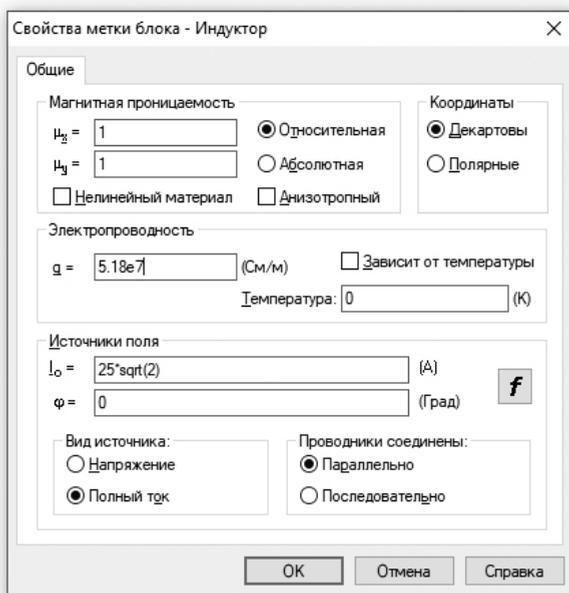
(удельное электрическое сопротивление  $\rho = 1,66 \cdot 10^{-7}$  Ом·м (удельная электрическая проводимость  $\sigma = 6 \cdot 10^6$  См/м)). Относительная магнитная проницаемость ферромагнитной трубы нелинейная и задана зависимостью от напряженности магнитного поля  $\mu(H)$ , представленной на рис. 3.114.



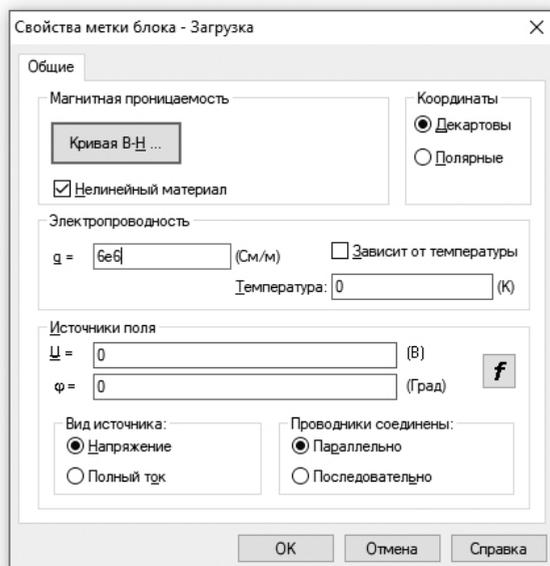
**Рис. 3.114. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля для стали 10**

Для уменьшения количества конечных элементов и, соответственно, времени расчета целесообразно, воспользовавшись соответствующими граничными условиями, производить моделирование не для всего поперечного сечения, а только для его четверти. На рисунке 3.116 а представлена расчетная область с наложенной сеткой дискретизации. Представленная геометрическая модель представляет собой  $\frac{1}{4}$  поперечного сечения исследуемой электромагнитной системы и позволяет моделировать электромагнитные процессы в устройствах индукционного, резистивного и индукционно-резистивного нагрева.

После создания в ELCUT геометрии исследуемой электромагнитной системы зададим электрофизические свойства используемых материалов. Следует отметить, что в ELCUT вместо привычного удельного электрического сопротивления задается значение удельной электрической проводимости. На рисунке 3.115 в качестве примера показано окно задания электрофизических свойств индуктора и загрузки.



а



б

Рис. 3.115. Окно задания электрофизических свойств материала индуктора (а) и загрузки (б) в ELCUT

Для индуктора в качестве источника поля задаем полный ток ( $1/4$  полного тока). Следует иметь ввиду, что в ELCUT необходимо задавать не действующее значение тока, а его амплитудное значение. Таким образом, зададим в нашей модели ток индуктора равным  $25 \cdot \sqrt{2}$  А.

В качестве граничного условия на внешней поверхности трубы задавалось значение напряженности магнитного поля:  $H = 994,7$  А/м (для индукционной и резистивной системы нагрева),  $H = 0$  (для индукционно-резистивной системы нагрева), на осях симметрии для всех случаев – нулевая тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_t = 0$ .

Значение напряженности магнитного поля на внешней поверхности трубы получено из закона полного тока:

$$H_0 = \frac{I}{2\pi r_0},$$

где  $r_0$  – наружный радиус трубы.

Действительно, для устройств индукционного и резистивного нагрева суммарный охваченный контуром циркуляции (в виде окружности с радиусом  $r_0$ ) электрический ток равен току индуктора (в устройстве индукционного нагрева сумма токов элементарных слоев трубы равна 0) или току трубы соответственно. Для индукционно-резистивного устройства комбинированного нагрева этот суммарный ток равен 0, поскольку направление тока индуктора и трубы взаимно противоположно.

На рисунке 3.116 б, в, г представлены дифференциальные результаты расчетов – распределения плотности тока в стенке ферромагнитной трубы для устройств индукционного, резистивного и комбинированного нагрева соответственно, полученные в ELCUT.

С использованием интегрального калькулятора ELCUT рассчитаем значения интегральных электрических и энергетических параметров для индукционно-резистивной системы нагрева (на 1 м длины): активная мощность в индукторе  $P_1 = 15,4$  Вт, активная мощность в нагрузке  $P_2 = 23,9$  Вт, напряжение питания  $U_1 = 0,45$  В. Нужно помнить, что приведенные значения активных мощностей получены путем умножения результатов ELCUT на 4, а приведенное значение  $U_1$  – делением на  $\sqrt{2}$ , поскольку программа выдает не действующее значение напряжения, а амплитудное.

Тогда суммарная активная мощность системы «индуктор–нагрузка»

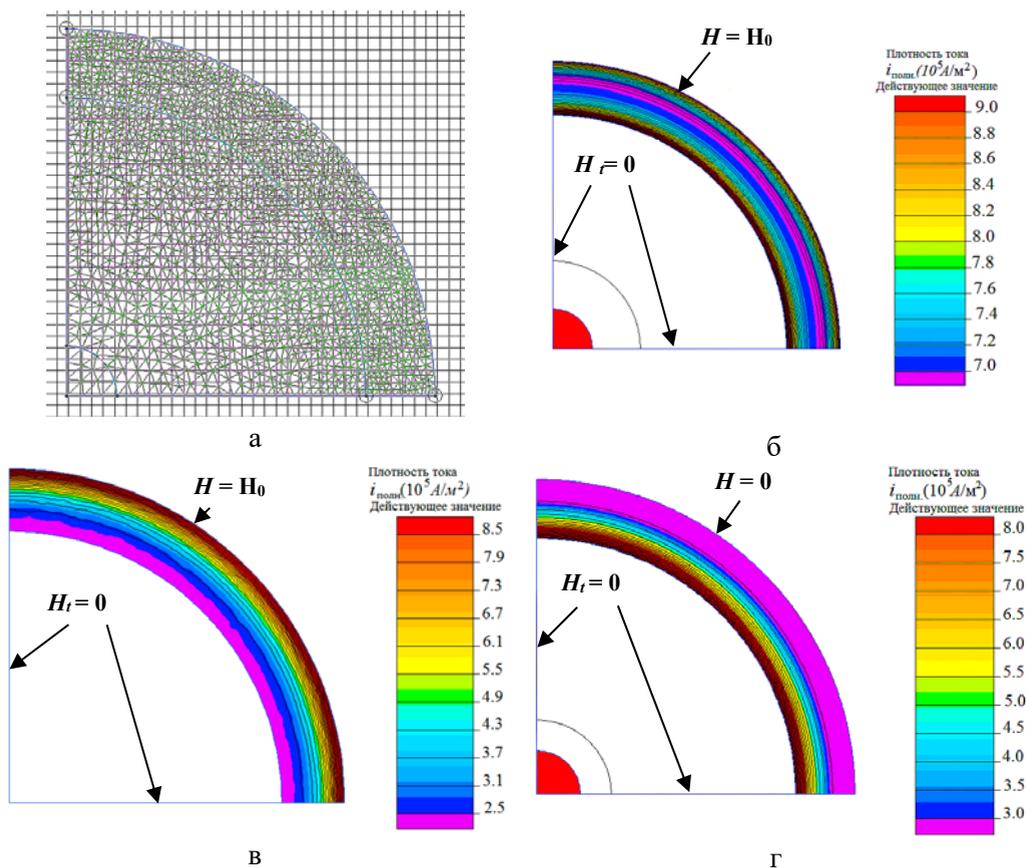
$$P = P_1 + P_2,$$

$$P = 15,4 + 23,9 = 39,3 \text{ Вт.}$$

Электрический КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P},$$

$$\eta = \frac{23,9}{39,3} = 0,61.$$



**Рис. 3.116.** Расчетная область с сеткой дискретизации (а) и распределение плотности тока в стенке ферромагнитной трубы для устройств индукционного (б), резистивного (в) и индукционно-резистивного (г) нагрева

В данном случае значение электрического КПД является условной величиной, поскольку индуктор является неохлаждаемым, поэтому активная мощность в индукторе за счет механизмов теплопередачи также идет на нагрев трубопровода с продуктом.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{U_1 \cdot I_1},$$

$$\cos \varphi = \frac{39,3}{0,45 \cdot 100} = 0,87.$$

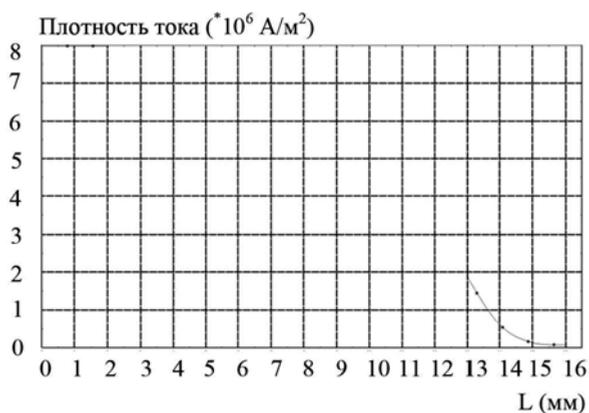
Напряжение на поверхности трубы получим в ELCUT с использованием функционала «Мастер импеданса»:

$$U_{\text{пов}} = 0 \text{ В.}$$

На рисунке 3.117 а представлено распределение плотности тока, а на рис. 3.117б – направленности магнитного поля по радиусу исследуемой системы (в индукторе, зазоре и стенке трубы).

Полученное на рис. 3.117а распределение полностью соответствует цветовой картине поля плотностей тока на рис. 3.116г. Из представленного на рис. 3.117б распределения видно, что напряженность на внешней поверхности трубы, действительно, равна 0.

Очень важным является факт, что полученные в ELCUT результаты не учитывают магнитный гистерезис (перемагничивание) стальной трубы. Для устройств низкотемпературного индукционного нагрева ( $t_{\text{нагр}} < t_{\text{к}}$ ) ферромагнитной стали, характеризующихся слабыми электромагнитными полями ( $H < 5 \text{ кА/м}$ ) и подобных в этом отношении рассматриваемому устройству индукционно-резистивного нагрева, это может привести к ошибке в расчетах до 20–30%.



а



б

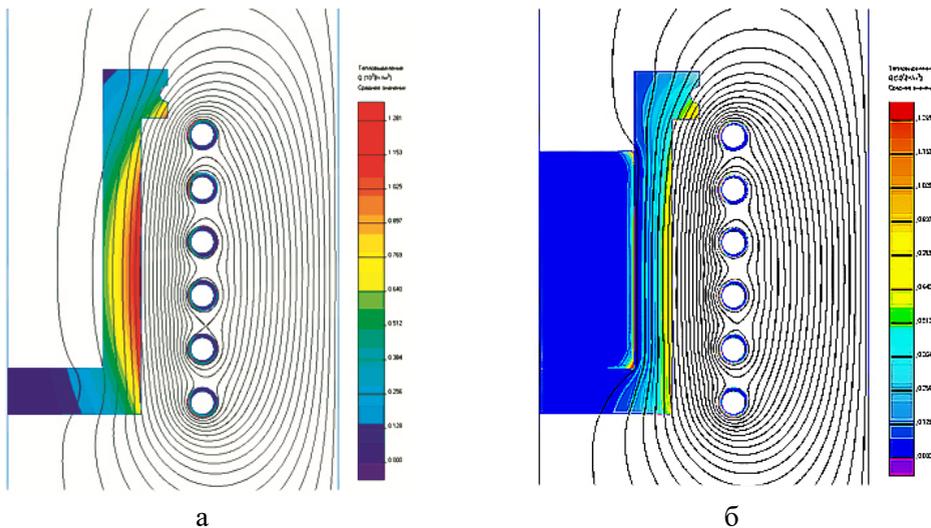
**Рис. 3.117. Распределение плотности тока (а) и направленности магнитного поля по радиусу исследуемой системы (б)**





### Основные результаты расчета ИТП с ПТ без металла и с медью

Параметр системы «индуктор – нагрузка»	Тигель без металла		Тигель с медью	
	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 1	Вар. 2
Напряжение индуктора $U_1$ , В	62,7	63,8	64,1	65,5
Мощность в индукторе $P_1$ , Вт	147	146	147	146
Мощность в тигле $P_{2.1}$ , Вт	1278	1286	1040	997
Мощность в меди $P_{2.2}$ , Вт	–		50	55
Суммарная мощность в нагрузке $P_{\Sigma}$ , Вт	1278	1286	1090	1052
Суммарная активная мощность $P_{\Sigma}$ , Вт	1425	1432	1237	1198
Полное сопротивление системы $z$ , Ом	0,348	0,354	0,356	0,364
Активное сопротивление системы $R$ , Ом	0,044	0,044	0,038	0,037
Индуктивное сопротивление системы $x_L$ , Ом	0,345	0,351	0,354	0,362
Электрический КПД $\eta$	0,897	0,898	0,881	0,878
$\cos \varphi$	0,126	0,125	0,107	0,102



**Рис. 3.120. Распределение удельной объемной мощности тепловыделения  
в индукторе и нагрузке печи:**

а – графитовый тигель без металла; б – графитовый тигель с медью

Из таблицы и рисунков видно, что наличие в графитовом тигле жидкой меди (в расчетах удельное сопротивление  $\rho$  меди принималось равным  $2,15 \cdot 10^{-7}$  Ом·м) оказывает существенное влияние на параметры системы «индуктор – нагрузка». Так, мощность тепловыделения в графитовом тигле при наличии в нем меди снижается почти на 20% при одном и том же токе индуктора, при этом мощность тепловыделения в самой меди представляет незначительную величину – около 50 Вт.

Это объясняется тем, что глубина проникновения электромагнитной волны в стенку графитового тигля толщиной 10 мм на частоте тока индуктора 22 кГц составляет около 13 мм, а поэтому на распределение напряженности магнитного поля, плотности тока и удельной объемной мощности тепловыделения в загрузке печи существенное влияние оказывает эффект индукционного нагрева двухслойной проводящей среды (подробнее об этом в разделе 3.7).

В результате расчетов также установлено, что при этом значение  $\rho$  меди, находящейся в графитовом тигле, слабо влияет на параметры системы «индуктор–загрузка» (значение  $\rho$  изменялось от значения, соответствующего жидкой меди при температуре 1100 °С, приведенного выше, до значения  $1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 20°С), поскольку оно все равно остается существенно меньшим по сравнению со значением  $\rho$  графита, слабо изменяющимся при нагреве.

Поскольку на начальном этапе технологического процесса плавки металла в ИТП с проводящим тиглем загрузка тигля представляет собой кусковую шихту, отдельные куски которой в электрическом отношении практически не связаны между собой, индуцированные токи замыкаются в основном в пределах каждого куска, а эквивалентное сопротивление такой кусковой загрузки в несколько раз превосходит аналогичное значение у жидкой меди, на этом этапе наличием в тигле металлической (в частности медной) шихты можно пренебречь и использовать результаты, полученные для тигля без металла.

При расчетах  $\rho$  графита принималось равным  $7,14 \cdot 10^{-6}$  Ом·м при 20 °С,  $7,6 \cdot 10^{-6}$  Ом·м – при 1100 °С.

На рисунке 3.121 приведены рассчитанные зависимости электрического КПД  $\eta$  и  $\cos \varphi$  системы «индуктор – загрузка» ИТП от частоты тока индуктора при двух режимах работы: 1 – холодный режим при температуре 20 °С, когда наличием внутри проводящего тигля кусковой шихты можно пренебречь при расчете; 2 – горячий режим при температуре 1100 °С, когда в проводящем тигле находится жидкая медь. Из рисунка 3.121 видно, что пока в тигле находится кусковая шихта, зависимости  $\eta$  и  $\cos \varphi$  соответствуют нагреву однослойной проводящей загрузки: с ростом частоты электрический КПД немного увеличивается, а  $\cos \varphi$  снижается. Аналогично ведут себя зависимости  $\eta$  и  $\cos \varphi$  при температуре 1100 °С, начиная с частоты тока около 32 кГц и до 88 кГц. При этих частотах электромагнитная волна полностью затухает в стенке проводящего тигля, и эффект индукционного нагрева двухслойного проводящего тела не проявляется. Сами значения  $\eta$  и  $\cos \varphi$  несколько больше, чем при 20 °С, что объясняется увеличением удельного электрического сопротивления материала проводящего тигля при нагреве. До частоты около 32–33 кГц загрузка печи проявляет себя как двухслойное проводящее тело. На этом участке значение электрического КПД с ростом частоты увеличивается значительно, поскольку тепловыделение в стенке тигля существенно растет, покрывая незначительное уменьшение тепловыделения в меди, а  $\cos \varphi$  при этом возрастает.

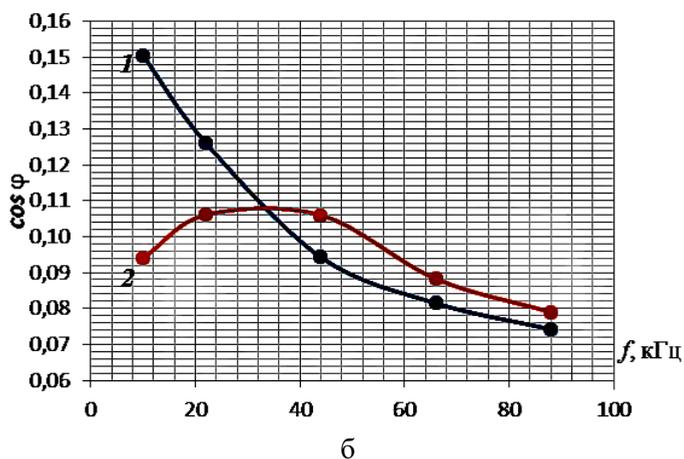
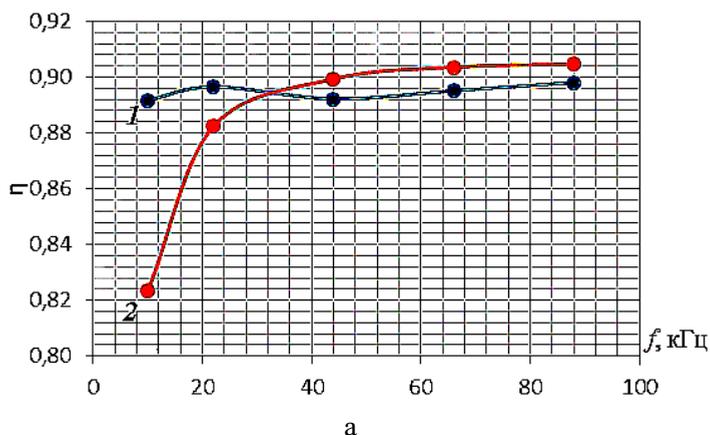


Рис. 3.121. Зависимости электрического КПД  $\eta$  (а) и  $\cos\phi$  (б) системы «индуктор - нагрузка» ИТП с ПТ от частоты тока индуктора: 1 – температура 20 °С; 2 – температура 1100 °С

На рисунке 3.122 представлены зависимости суммарной мощности тепловыделения в нагрузке ИТП с проводящим тиглем от значения тока индуктора при различной частоте тока: 10, 22, 44 и 88 кГц. Из рисунка 3.122 видно, что при частотах 44 и 88 кГц свойства нагрузки как двухслойного тела не проявляются, значения мощности в горячем режиме несколько превышают значения мощности в холодном режиме во всем диапазоне изменения тока индуктора. На частотах же 10 и 22 кГц нагрузка при температуре 1100 °С ведет себя как двухслойное тело, поэтому суммарная мощность тепловыделения в нагрузке при этой температуре существенно меньше мощности тепловыделения в холодном режиме.

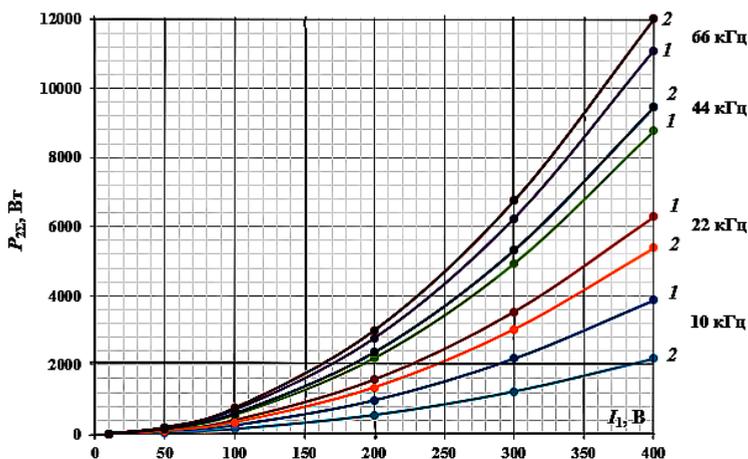


Рис. 3.122. Зависимости суммарной мощности тепловыделения в загрузке ИТП с ПТ от тока индуктора при различной частоте и температуре 20°C (кривые 1) и 1100°C (кривые 2)

*В качестве самостоятельной работы* предлагается решить задачу расчета электрических характеристик ИТП с проводящим ферромагнитным (стальным) тиглем для плавки магния, чертеж которой с размерами приведен на рис. 3.123. Масса тигля составляет 0,5 кг. Объем тигля – 280 см<sup>3</sup>. Тигель изготовлен из конструкционной магнитной стали марки 20. На рисунке уровень металла в тигле соответствует 0,5 кг магния. Размеры индуктора те же, что и в задаче с графитовым тиглем.

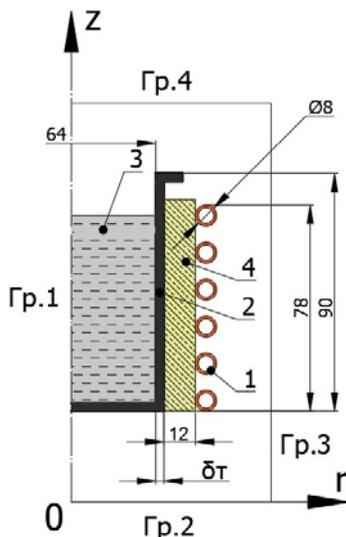
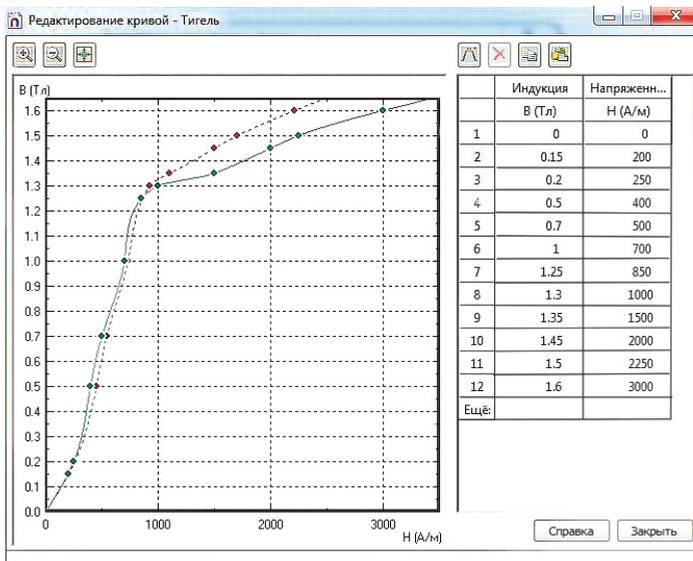
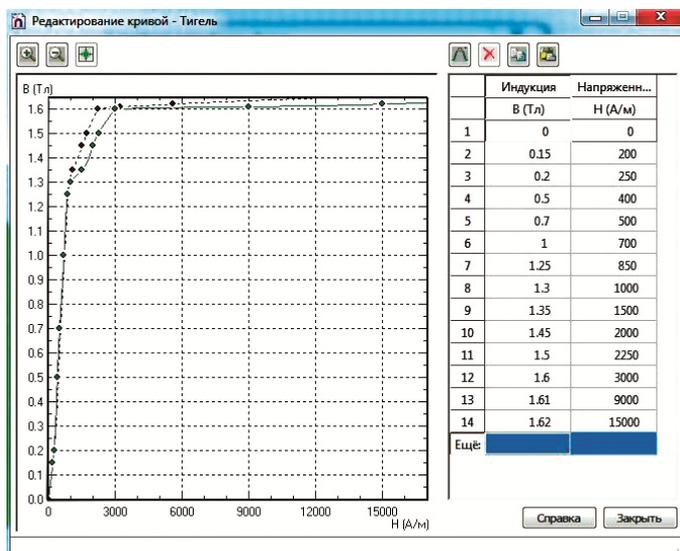


Рис. 3.123. Эскиз системы «индуктор-загрузка»: 1 – индуктор; 2 – тигель; 3 – жидкий металл; 4 – теплоизоляция

Основная кривая намагничивания материала стального тигля в графическом и табличном видах приведена на рис. 3.124.



а



б

**Рис. 3.124. Окно программы ELCUT для задания основной кривой намагничивания материала стального тигля:**  
 а – напряженность магнитного поля до 3000 А/м;  
 б – напряженность магнитного поля до 15000 А/м

Необходимо рассчитать электрические и энергетические характеристики печи для двух случаев: холодный режим (температура 20 °С, наличием в тигле магниевой шихты можно пренебречь, поскольку электромагнитная волна полностью затухает в стенке стального тигля) и горячий режим (в тигле находится расплав магния с удельным электрическим сопротивлением  $\rho = 8,5 \cdot 10^{-7}$  Ом·м при температуре разливки 750 °С, относительная магнитная проницаемость тигля в этом режиме  $\mu = 1$ ).

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие устройства индукционного нагрева от установки индукционного нагрева?
2. Что включает в себя индукционная установка?
3. В чем состоит отличие индукционных плавильной и нагревательной установки?
4. Для осуществления каких электротехнологических процессов предназначены индукционные нагревательные установки?
5. Какие диапазоны частот применяют при индукционном нагреве? Каким областям применения соответствуют эти диапазоны частот?
6. Каковы значения параметров (ориентировочно) электромагнитных полей при индукционной плавке металлов?
7. В чем состоят особенности установок индукционного нагрева с точки зрения их безопасной для обслуживающего персонала эксплуатации?
8. Какие уравнения дают полное математическое описание электромагнитного поля в проводящей и непроводящей среде?
9. В чем состоит физический принцип индукционного нагрева?
10. Каким параметром характеризуется непостоянство параметров электромагнитного поля в нагреваемом проводящем теле? В чем состоит физический смысл этого параметра?
11. Какие физические явления при протекании переменного тока в проводниках вы знаете?
12. В чем состоит поверхностный эффект при протекании переменного тока по проводникам?
13. В чем состоят эффект близости и кольцевой (катушечный) эффект при протекании переменного тока по проводникам?
14. Почему при эффекте «магнитного паза» электрический ток вытесняется на открытую поверхность проводника?
15. Почему по картине распределения напряженности магнитного поля  $H$  в пространстве у поверхности проводников можно качественно оценить картину распределения плотности тока  $J$  в самих проводниках?
16. Что представляет собой система «индуктор – загрузка»?
17. Из каких основных участков состоит система «индуктор – загрузка»?

18. При каких условиях значение идеального электрического КПД системы «индуктор – загрузка» максимально?
19. Какими способами можно увеличить значение электрического КПД системы «индуктор – загрузка»?
20. С какой целью в установках индукционного нагрева применяют ферромагнитные экраны (магнитопроводы) и электромагнитные экраны?
21. Какие типы систем «индуктор – загрузка» с точки зрения конфигурации электромагнитного поля вы знаете?
22. Как рассчитываются параметры электромагнитной волны в полубесконечном проводящем теле? В чем состоит отличие аналитического и численного методов расчета?
23. Как влияют геометрические параметры проводящего тела на распределение  $H$  и  $E$  по координате, а также на значения активной и реактивной мощностей  $P$  и  $Q$ , выделяющихся в нагреваемом теле? Рассмотрите случаи проводящих плиты и цилиндра.
24. Почему для водоохлаждаемого медного индуктора при частоте 50 Гц оптимальная толщина стороны трубки индуктора, обращенной к загрузке, равна 13 мм?
25. Как изменяются электрофизические свойства проводящего тела при индукционном нагреве?
26. Как влияют электрофизические свойства проводящей загрузки на основные интегральные характеристики системы «индуктор – загрузка»?
27. Как влияют электрофизические свойства проводящей загрузки на распределение параметров электромагнитной волны для полубесконечного проводящего тела?
28. Как рассчитывается распределение напряженности магнитного поля  $H$  на непроводящих участках системы «индуктор – загрузка»?
29. Какие виды силовых взаимодействий в электромагнитных полях вы знаете?
30. Как проявляется действие электромагнитных сил при индукционном нагреве? Приведите примеры.
31. Как проявляется действие электродинамических сил в индукционных тигельных печах?
32. Перечислите металлы, выплавляемые в индукционной тигельной печи (ИТП).
33. Какие требования предъявляются к шихте для ИТП?
34. Дайте обоснование целесообразности плавки чугуна в индукционной тигельной печи промышленной частоты с оставлением «болота».
35. Для чего применяются индукционные тигельные миксеры и чем они отличаются от ИТП?
36. Какие проводники используются для изготовления индукторов (материал и форма сечения)?
37. На каких частотах применяются ферромагнитные экраны (магнитопроводы) и на каких – электромагнитные экраны?

38. Укажите позитивные и негативные факторы движения расплава в ИТП под действием электромагнитных сил.
39. Приведите примеры металлов, выплавляемых в вакуумных ИТП.
40. Для плавки каких металлов используются проводящие тигли?
41. Перечислите металлы, выплавляемые в индукционных канальных печах (ИКП).
42. Сравните основные технико-экономические показатели ИКП и индукционных тигельных печей.
43. Для чего нужно и как достигается однонаправленное движение расплава в каналах ИКП?
44. Назовите основные варианты конструктивного выполнения ИКП.
45. Почему электрический КПД у ИКП выше, чем у ИТП?
46. Почему сталь не плавят в ИКП с закрытыми каналами?
47. Как осуществляется перемешивание расплавленного металла в ИКП?
48. Что представляет собой центробежный эффект в открытых ИКП?
49. Что представляет собой пинч-эффект в ИКП?
50. Назовите основные факторы, определяющие требуемую температуру нагрева стальных заготовок под обработку давлением.
51. От каких факторов зависит допустимая неравномерность распределения температуры по объему металлической заготовки на выходе индукционного нагревателя?
52. Какие физические и технико-экономические факторы ограничивают уменьшение времени нагрева при использовании ускоренного изотермического нагрева?
53. Что ограничивает увеличение удельной поверхностной мощности при индукционном сквозном нагреве?
54. Для чего применяются магнитопроводы в установках индукционного сквозного нагрева?
55. Назовите пять технологических процессов с применением низкотемпературного индукционного нагрева ферромагнитной стали и укажите значения температур и удельных поверхностных мощностей для каждого процесса.
56. В каких случаях применяют комбинированный индукционно-резистивный нагрев? Приведите примеры технологических устройств.
57. Какими показателями определяется преимущество применения индукционного нагрева в промышленности строительных материалов?
58. Почему температура нагрева под поверхностную закалку связана со скоростью нагрева?
59. Как объясняется различие в выборе закалочной температуры для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей?
60. Каковы основные преимущества высокочастотной закалки по сравнению с использованием электропечей сопротивления?

61. В чем отличие выбора частоты установки при поверхностной закалке и сквозном нагреве?
62. Когда обычно используют большие значения удельной поверхностной мощности: при поверхностном или глубинном нагреве?
63. Какие факторы влияют на выбор метода закалки: одновременная или непрерывно-последовательная?
64. Почему закалочные индукторы обычно не имеют футеровки?
65. Почему с увеличением частоты уменьшаются массогабаритные показатели трансформаторов?
66. Какие физические процессы определяют качество индукционной сварки стальных труб?
67. Сравните технико-экономические показатели различных схем сварки труб.
68. Какие факторы определяют повышение качества пайки при применении индукционного нагрева?
69. Как выбирается зазор между деталями, подлежащими пайке с использованием индукционного нагрева?
70. Почему при пайке труб необходимо производить предварительную механическую обработку?
71. Назовите характерные значения технико-экономических показателей установок для индукционной пайки: частота, КПД, удельная мощность, время нагрева.
72. Что дает применение вакуумной пайки или использование при пайке контролируемой атмосферы?
73. В чем состоит физический принцип диэлектрического нагрева?
74. Какие существуют типы поляризации?
75. Для каких технологий применяют диэлектрический нагрев?
76. Для чего применяется магнетрон?
77. Назовите основные технические характеристики устройств диэлектрического нагрева.
78. Сравните схемы симметрирующих устройств, используемых в системах управления плавильными печами промышленной частоты.
79. Какие способы согласования нагрузки и преобразователя используют в системах управления индукционными установками повышенной частоты?
80. Какими особенностями характеризуется индукционная установка как объект управления?
81. Какие технологические и конструктивные признаки индукционных установок используют для классификации систем управления?
82. Рассмотрите особенности построения систем управления тепловым режимом индукционных установок.

### Список рекомендуемой литературы к главе 3

1. История электротехники / под ред. И.А. Глебова. – М.: Издательство МЭИ, 1999.
2. Шевцов, М.С. Развитие электротермической техники / М.С. Шевцов, А.С. Бородачев. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Установки индукционного нагрева / под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981.
4. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи / А.М. Вайнберг. – М.: Энергия, 1967.
5. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Кувалдин, А.Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева / А.Б. Кувалдин. – М.: Издательство МЭИ, 1999.
7. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Федин, М.А. Выбор методики расчета и исследование электрических характеристик индукционных тигельных печей с проводящим тиглем / М.А. Федин, А.Б. Кувалдин, А.О. Кулешов // Вестник МЭИ. – 2017. – № 3. – С. 77 – 86.
9. Кувалдин, А.Б. Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных проводящих средах / А.Б. Кувалдин, М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков и др. // Электричество. – 2005. – №11. – С. 56 – 61.
10. Кувалдин, А.Б. Теория индукционного нагрева: В 2 ч. Ч. 1: Основные характеристики и расчет параметров электромагнитного поля: учеб. пособие / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин. – М.: Издательство МЭИ, 2018.
11. Кувалдин, А.Б. Моделирование электромагнитного поля в ферромагнитной стали при индукционном, электроконтактном и комбинированном нагреве / А.Б. Кувалдин, М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков и др. // Индукционный нагрев. – 2010. – №13. – С. 15 – 19.
12. Kuvaldin, A. Development of mathematical model for calculating electric and power characteristics of induction crucible furnace with lumpy charge on using finite elements method / A. Kuvaldin, M. Fedin, E. Kasatkina // Proceedings of the 11th IFOST / NSTU. – Novosibirsk, 2016. – P. 91 – 95.
13. Простяков, А.А. Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна: учеб. пособие для вузов / А.А. Простяков. – М.: Энергия, 1977.
14. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. – Энергия, 1965.
15. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. – М.: Metallurgia, 1979.
16. Плавильные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование / В.И. Лузгин, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов и др. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.
17. Фарбман, С.А. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов / С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. – М.: Metallurgia, 1968.

18. Электротермическое оборудование: Справочник / под общей ред. А.П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980.
19. Индукционные тигельные печи / Л.И. Иванова, Л.С. Грובה, Б.А. Сокунов и др. – Екатеринбург: Издательство УГТУ – УПИ, 2002.
20. Цыганов, В.А. Плавка цветных металлов в индукционных печах / В.А. Цыганов. – М.: Металлургия, 1974.
21. Индукционные каналные печи / Л.И. Иванова, Л.С. Грובה, Б.А. Сокунов. – Екатеринбург: Издательство УГТУ – УПИ, 2002.
22. Кувалдин, А.Б. Технологические процессы с применением индукционного нагрева / А.Б. Кувалдин. – М.: Изд-во МЭИ, 1990.
23. Безручко, И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки / И.И. Безручко. – Л.: Машиностроение, 1987.
24. Струпинский, М.Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. Настольная книга специалиста по электрообогреву: справочник / М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Б. Кувалдин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023.
25. Основы электротехнологии: учеб. пособие / М.А. Федин, М.Я. Погребиский, А.О. Кулешов и др. – М.: Издательство МЭИ, 2019.
26. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.В. Нетушил, Б.Я. Жуховицкий, В.Н. Кудин и др.; под общей ред. А.В. Нетушила. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.
27. Княжевская, Г.С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г.С. Княжевская, М.Г. Фирсова, Р.Ш. Килькеев. – П.: Машиностроение, 1989.
28. Миронова, А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротехнологических установок: учеб. пособие / А.Н. Миронова, Ю.М. Миронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2020.
29. Рубцов, В.П. Исполнительные элементы систем автоматического управления электротехнологическими установками: учеб. пособие / В.П. Рубцов. – М.: Издательство МЭИ, 2001.
30. Рубцов, В.П. Системы автоматического управления индукционными установками: учеб. пособие / В.П. Рубцов, А.В. Щербаков. – М.: Издательство МЭИ, 2017.
31. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
32. Кувалдин, А.Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева. Ч. 2. Методы расчета и моделирование: учеб. пособие / А.Б. Кувалдин, М.А. Федин. – М.: Издательство МЭИ, 2020.

## УСТАНОВКИ ДУГОВОГО НАГРЕВА И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

### 4.1. Электрическая дуга. Распределения мощности в дуговых печах

#### 4.1.1. Открытие дуги. Классификация дуговых печей

В 1803 г. русский ученый профессор Василий Петров совершил открытие электрической дуги (рис. 4.1) и впервые исследовал различные физические и технологические особенности этого уникального физического явления: зажигание дуги между угольными электродами, расплавление металлов в дуге, окисление металлов при нагреве дугой, восстановление металлов из оксидов.

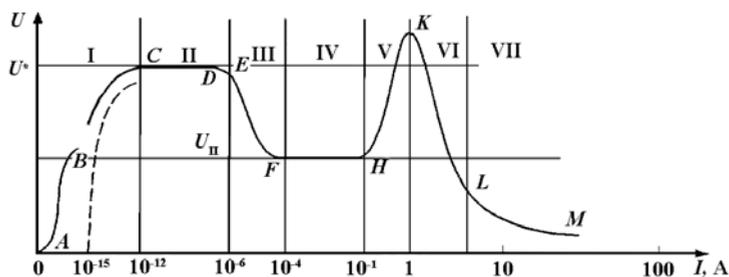
**ИЗВѢСТІЕ**  
о  
**ГАЛЬВАНИ - ВОЛЬТОВСКИХЪ**  
**ОПЫТАХЪ,**  
которые производилъ  
*Профессоръ Физики Василій Петровъ,*  
посредствомъ огромной наипаче бат-  
терей, состоявшей некогда изъ 4200  
мѣдныхъ и цинковыхъ кружковъ, и на-  
ходящейся при Санкт - Петербургской  
Медико - Хирургической Академіи.

---

**ВЪ САНКТ-ПЕТЕРБУРГѢ,**  
Въ Типографіи Государственной Ме-  
дицинской Коллегіи, 1803 года.

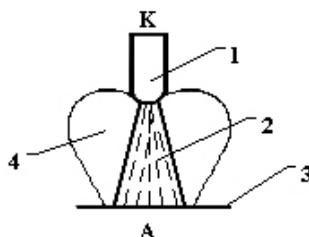
Рис. 4.1. Публикация 1803 г. об открытии дуги В. Петровым

Электрическая дуга является одним из видов электрического разряда в газе. В дуге заряды переносятся между электродами с помощью свободных электронов и ионов. Как видно из схематичной вольт-амперной характеристики электрических разрядов в газовой среде, представленной на рис. 4.2, дуга характеризуется значительно большим значением тока по сравнению с большинством видов разрядов. Дуга относится к самостоятельным разрядам. Это означает, что для ее поддержания не требуется каких-либо внешних ионизирующих воздействий.

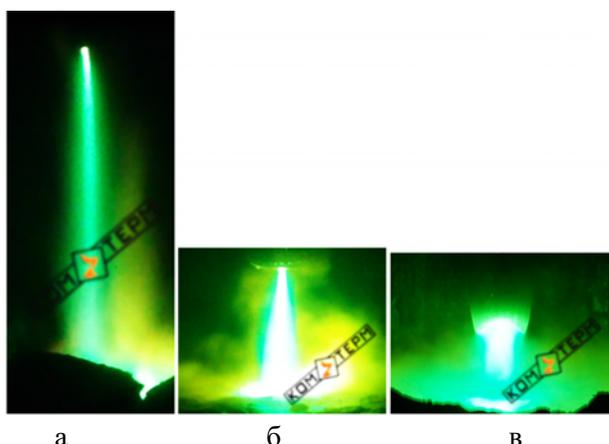


**Рис. 4.2. Схематическая вольт-амперная характеристика газовых разрядов:**  
 I – несамостоятельный разряд, II – темный (таунсендовский) разряд,  
 III – переходная область, IV – нормальный тлеющий разряд,  
 V – аномальный тлеющий разряд, VI – переходная область, VII – дуговой разряд

Строение дугового разряда в печи постоянного тока показано на рис. 4.3. Основными частями дугового разряда между катодом и анодом являются дуговой столб, прикатодная и прианодная области. На рисунке 4.4 представлено фото свободно горящей дуги в промышленной дуговой сталеплавильной печи постоянного тока вместимостью 2 т (при питании от преобразователя, выполненного на базе IGBT-транзисторов).



**Рис. 4.3. Строение электрической дуги:**  
 1 – электрод-катод (К); 2 – столб дуги; 3 – электрод-анод (А); 4 – факел дуги



**Рис. 4.4. Фото дуги в печи ДПС-2 со стабилизированным источником питания в транзисторном исполнении:**  
 а – начало; б – середина; в – окончание периода расплавления стали

В электротехнологии наиболее широко используются дуги двух типов: стабилизированные потоком газа (плазменные) и свободно горящие. Разнообразие технических приложений электродуговых процессов, определяется различием характеристик дуговых разрядов, которые зависят от условий горения дуги:

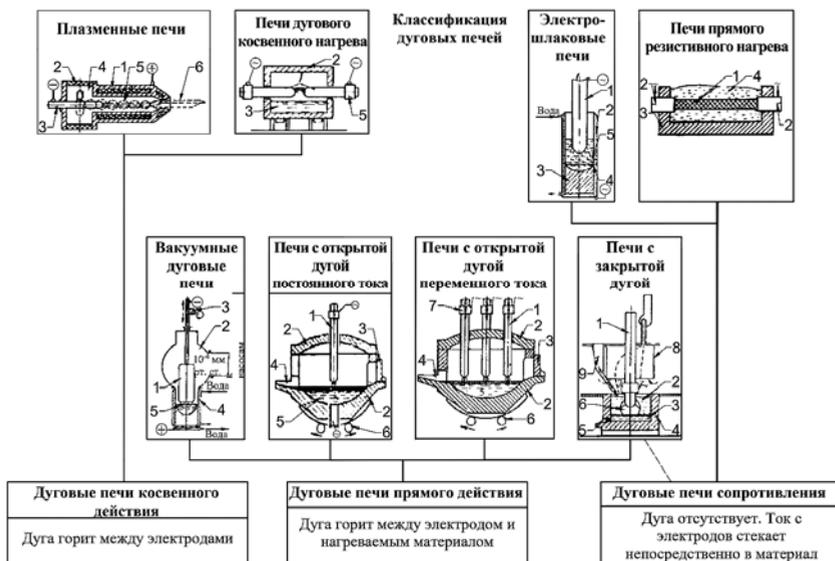
- состава газовой атмосферы в разрядном промежутке – в газах и в парах;
- давления – атмосферные, при пониженном (вакуумные) и при повышенном давлении;
- материала и агрегатного состояния электродов, особенности процессов на катоде: дуги с «холодным» и с «горячим» катодом;
- особенности теплообмена с окружающим технологическим пространством – дуги короткие и длинные;
- степени проявления электродинамических эффектов при различных уровнях и видах протекающих токов – стационарные, нестационарные, квазистационарные;
- характера протекания переходных процессов в разрядном промежутке: слабо инерционные, со средней инерционностью, с высокой инерционностью.

В электротехнологических установках, в зависимости от характера теплообмена дуги с рабочей средой, используют:

- прямой нагрев, при котором одним из электродов является нагреваемый материал, либо
- косвенный нагрев, при котором ток дуги не замыкается через нагреваемый материал, а передача к нему тепла от дуги осуществляется излучением, конвекцией, теплопроводностью или их комбинацией.

На рисунке 4.5 приведена классификация дуговых печей по характеру выделения и распределения мощности в рабочем пространстве печи. Традиционно, также как и в [1], к дуговым печам отнесены печи прямого резистивного нагрева (дуговые печи сопротивления). Особенности расчета и проектирования печей прямого резистивного нагрева, включенных в данную классификацию, имеют много общего с дуговыми печами. Этим объясняется целесообразность их совместного рассмотрения в данной главе. Кроме того, при разработке и эксплуатации печей прямого резистивного нагрева, равно как электрошлаковых и ряда руднотермических печей, важно обеспечить условия, при которых дуга в печи не возникнет, либо её интенсивность будет ограничена. Поэтому, знание основ дугового нагрева важно при изучении всех типов печей, рассмотренных ниже.

В плазменных печах, которые на рис. 4.5 указаны как печи косвенного действия, дуговой разряд горит между анодом 1, объединенным с водоохлаждаемым корпусом плазмотрона, и катодом 3. Между электродами выполнена изоляционная вставка 2. Плазмообразующий газ подается в камеру 4 плазмотрона. Стабилизированная потоком газа или магнитным полем дуга 5 обеспечивает формирование на выходе сопла плазмотрона плазменной струи 6. В плавильных печах используются также плазматроны прямого действия с дугой, горящей между электродом плазматрона и расплавляемым металлом.



**Рис. 4.5. Классификация дуговых печей**

В печах дугового косвенного нагрева дуга открыто горит между электродами 1, рабочие торцы которых расположены внутри футерованного корпуса 2. Тепловое излучение дуги обеспечивает нагрев и плавление помещенных в корпус 2 материалов 3. Для подвода тока к электродам используются электрододержатели 5.

К дуговым печам прямого действия относятся вакуумные дуговые печи (ВДП), открытые дуговые печи постоянного (ДППТ) и переменного тока (ДСП), а также руднотермические печи (РТП-печи с закрытой дугой).

В вакуумных дуговых печах расходимый электрод 1 расположен в вакуумной камере 2. С помощью механизма 3 поддерживается зазор между электродом 1 и жидкой ванной металла 5, при застывании которого в кристаллизаторе 4 формируется металлический слиток.

В дуговых печах постоянного и переменного тока открытая дуга горит между графитированными электродами 1, пропущенными в печь через футеровку 2 свода, и металлом 5, который удерживается футеровкой 2 ванны печи. Для выполнения технологических операций и обслуживания футеровки печи используется дверца рабочего окна, а для слива из печи готового металла – выпускное отверстие 4 со сливным носком. Для наклона печи при сливе металла и скачивании шлака служит механизм наклона 6. В дуговых печах постоянного тока катодом (обозначен знаком «-») является сводовый электрод, который располагается по оси симметрии круглой ванны печи. Для подвода тока к металлической ванне (аноду) используется подовый электрод (обозначен знаком  $\oplus$ ). В дуговых печах переменного тока трехфазный ток (обозначен знаками  $\sim$ ) подводится к трем сводовым электродам, оси которых расположены в плане по вершинам равностороннего треугольника.

К дуговым печам сопротивления относят руднотермические печи, печи электрошлакового переплава (ЭШП) и печи прямого резистивного нагрева. Путем резистивного нагрева в таких печах выделяется вся тепловая мощность, либо значительная ее часть. К классу дуговых печей подобные печи относят из-за конструктивного сходства с ними, так как основным конструктивным элементом здесь является электрод, подводящий ток к нагреваемому материалу.

Руднотермические печи, в зависимости от реализуемых в них разнообразных технологических процессов, бывают с открыто горящей дугой, с шунтированной сопротивлением шихты дугой (которая горит под слоем шихты) либо без образования дугового разряда. В последнем случае, тепло выделяется за счет резистивного нагрева, а дуга может возникнуть в районе рабочего торца электрода 1 в некоторых эксплуатационных режимах. В РТП дуга шунтирована сопротивлением шихты 2 и горит между электродом 1 и расплавленным металлом или шлаком 3. Следовательно, такие РТП относятся к печам прямого дугового нагрева. Расплав и шихта удерживаются внутри футерованного корпуса 4 печи. Выпуск из печи готового расплава производится через летку 5. В результате окислительно-восстановительных реакций в печи образуется большое количество газов. Создаваемое газами давление обеспечивает возникновение в зоне рабочего торца электрода полости 6, в которой горит дуга. Ток к электроду подводится с помощью электрододержателя 7. Для сбора и удаления образующихся газов служит зонтик 8. Система загрузки шихты 9 обеспечивает подачу на колошник печи шихты (заранее подготовленной смеси руды с восстановителем).

В ЭШП расходуемый электрод 1 переплавляется в кристаллизаторе 2 с образованием металлического слитка 3. В верхней части слитка образуется ванна жидкого металла 4. Нагрев и плавление металла происходит преимущественно благодаря резистивному нагреву шлаковой ванны 5, в которую погружен расходуемый электрод 1.

В печах прямого резистивного нагрева джоулево тепло выделяется в керне 1, к которому через электроды 2 подводят электрический ток. Футеровка печи 3 заполнена шихтой, которая образует гарнисаж 4, являющийся теплоизоляцией. Исходные материалы, образующие керн, в результате интенсивного нагрева превращаются в целевой продукт.

#### ***4.1.2. Физические основы процессов в установках с нагревом электрической дугой***

Необходимым условием поддержания дуги как самостоятельного электрического разряда является испускание (*эмиссия*) электронов с поверхности катода, который обычно изготавливается из металла или графита, имеющих высокую электропроводность.

В металле электроны имеют энергию более низкую, чем свободный электрон при отсутствии внешних полей, т.е. находятся в потенциальной яме. Электроны плотно заполняют энергетические состояния от «дна» ямы до значения, называемого граничной энергией Ферми, которое определяется максимальной кинетической энергией электрона при нулевой температуре.

Разность потенциальных энергий электрона в вакууме и в металле определяет **работу выхода** электрона, которую необходимо совершить при его эмиссии с поверхности катода. Работа выхода различных металлов имеет порядок нескольких электронвольт (Fe – 4,31; Al – 4,25; Cu – 4,4; Mo – 4,3; W – 5,32). На работу выхода влияет также наличие на поверхности катода адсорбированных веществ и внешнее электрическое поле.

Если при высокой температуре катода энергия наиболее быстрых электронов превышает работу выхода, то возникает эмиссия электронов, называемая **термоэлектронной**. **Плотность тока термоэлектронной эмиссии** в катодном пятне дуги определяется в соответствии с **законом Ричардсона-Дэшмана** (4.1). На рисунке 4.6 приведена зависимость плотности тока термоэлектронной эмиссии от температуры для некоторых металлов.

$$J_e = BT^2 \cdot e^{-\frac{\phi}{kT}}, \quad (4.1)$$

где  $J_e$  – плотность тока эмиссии, А/см<sup>2</sup>;  $T$  – абсолютная температура поверхности катода под пятном дуги, К;  $\phi$  – работа выхода электронов для материала катода, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $8,617 \cdot 10^{-5}$  эВ/К;  $B$  – эмиссионная константа для материала катода, (для графита  $B = 30$  А/(см<sup>2</sup>·К)).

Если металл нагрет до температуры термоэлектронной эмиссии, то внешнее электрическое поле (даже относительно небольшой напряженности порядка  $10^6$  В/см) усиливает эмиссию. В этом случае плотность тока эмиссии определяется **уравнением Ричардсона–Шотки**:

$$J_e = AT^2 \cdot e^{-\frac{e_0(\phi - \sqrt{eE})}{kT}}, \quad (4.2)$$

где  $e_0$  – заряд электрона;

$E$  – напряженность внешнего электрического поля;

$A$  – константа.

Электроны могут покинуть металл также под действием высокой напряженности электрического поля вблизи поверхности катода (превышающей  $5 \cdot 10^7$  В/см). Плотность тока такой эмиссии при  $T = 0$ , называемой автоэлектронной или электростатической, определяется выражением:

$$J_e = A_2 E^2 \cdot e^{-\frac{B_2}{E}}, \quad (4.3)$$

где  $A_2$  и  $B_2$  – константы.

Электроны, эмитированные из катода, под действием электрического поля в разрядном промежутке движутся в сторону анода. При этом они сталкиваются с нейтральными и заряженными частицами. Полученная электронами от электрического поля кинетическая энергия перераспределяется между всеми частицами. В результате обмена энергией температура частиц в столбе дуги выравнивается, что характеризует как *термическое состояние газа в дуге*. Термическое равновесие означает, что температура всех частиц примерно одинакова ( $T_e = T_i = T_a = T$ ). Термическое равновесие наблюдается не всегда, например, при пониженном давлении оно отсутствует.

Дрейф заряженных частиц под действием градиента потенциала определяет ток, протекающий через разрядный промежуток между электродами. Приближаясь в столбе дуги к аноду, электроны, ускоряемые электрическим полем, его бомбардируют. Положительные ионы, образованные ударами электронов об атомы анода, уходят под действием электрического поля в сторону катода. У анода образуется область *отрицательного объемного заряда*, чем обусловлено падение потенциала вблизи анода. Энергия пришедших на анод электронов преимущественно передается электронам проводимости в аноде. Лишь малая часть кинетической энергии электронов передается узлам кристаллической решетки материала анода.

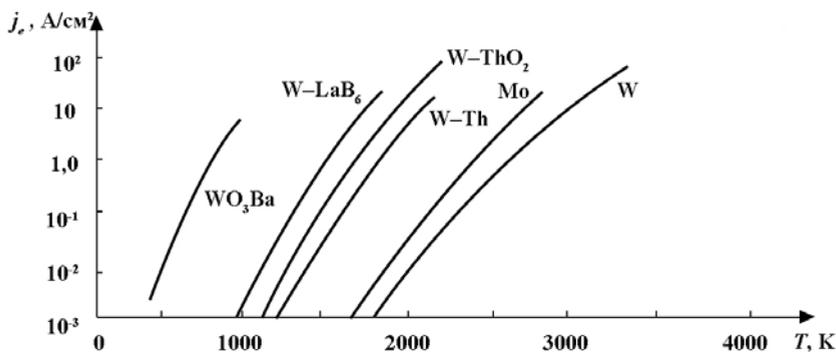


Рис. 4.6. Плотность тока термоэлектронной эмиссии

При взаимодействии электронов, ионов и нейтральных атомов в столбе дуги устанавливается равновесие между процессами возбуждения, ионизации, релаксации и рекомбинации. **Возбуждение** электронных состояний атома, молекулы, иона – это переход электрона (как правило, валентного электрона) с низкого на более высокий энергетический уровень. **Релаксация** – это обратный процесс, при котором электрон переходит на более низкий энергетический уровень. При этом излучается  $\gamma$ -квант. **Ионизация** – это предельный случай электронного возбужде-

ния атома, при котором связанный с атомом электрон приобретает энергию, достаточную для отрыва от атома. При каждом элементарном процессе возбуждения может произойти ионизация, если для этого достаточно энергии электрона. **Рекомбинация** – это обратный процесс, при котором нейтрализуется заряд сталкивающихся противоположно заряженных частиц. Степень ионизации определяется **уравнением Саха** (4–4), а ее зависимость от температуры представлена на рис. 4.7.

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 3,6 \cdot 10^{-2} T^{2,5} e^{-\frac{e_0 \cdot U_{и}}{kT}}, \quad (4.4)$$

где  $x$  – степень ионизации;  $p$  – давление; Па;  $T$  – температура, К;  $e_0 \cdot U_{и}$  – работа ионизации;  $k$  – постоянная Больцмана.

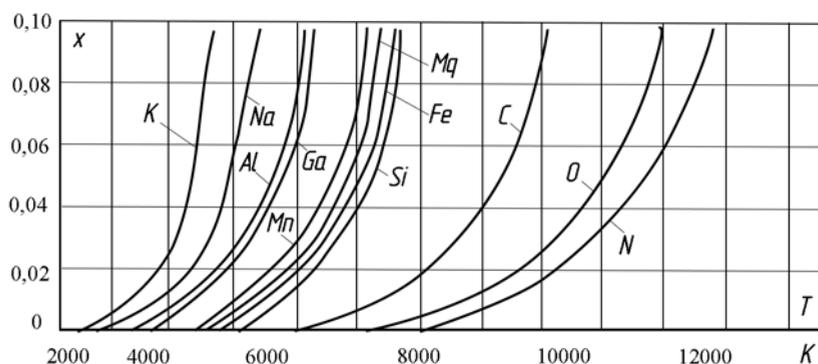


Рис. 4.7. Зависимость степени ионизации ряда элементов от температуры

Не смотря на присутствие в плазме столба большого количества заряженных частиц, плазма столба в целом электрически нейтральна.

Энергия  $W_i$ , затрачиваемая электроном с зарядом  $e_0$  на ионизацию атома, определяет **потенциал ионизации**  $\phi_i = W_i / e_0$ , который измеряется в электронвольтах. Первый потенциал ионизации  $\phi_1$  определяется наименьшим количеством энергии, необходимой для удаления одного электрона от свободного атома в его низшем (основном) энергетическом состоянии. Более высокие потенциалы ионизации: второй  $\phi_2$ , третий  $\phi_3$  и т.д. соответствуют энергии, затрачиваемой на отрыв следующих электронов от однократно, двукратно (и т.д.) ионизированных положительных ионов.

Потенциал ионизации атомов веществ периодически изменяется, как показано на рис. 4.8, с порядковым номером  $z$  элементов в периодической таблице Менделеева. Наименьший потенциал ионизации имеют пары франция ( $\phi_1 = 3,753$  эВ) и цезия ( $\phi_1 = 3,893$  эВ). Наивысший потенциал ионизации  $\phi_1 = 24,58$  эВ наблюдается у самого легкого из благородных газов – гелия. Электронная оболочка инертных газов заполнена и поэтому прочна.



Коэффициент пропорциональности между величинами скорости дрейфа заряженной частицы и напряженностью электрического поля называется **подвижностью** (соответственно, электрона  $u_e$  и иона  $u_i$ ):

$$u_e = \frac{v_d(e)}{E} = \frac{e_0 \lambda_e}{m v_e}, \quad (4.7)$$

$$u_i = \frac{v_d(i)}{E} = \frac{e_0 \lambda_i}{M v_i} \quad (4.8)$$

где  $\lambda_e, \lambda_i$  – длина свободного пробега электрона и иона.

**Диффузией** в газе называется перемещение частиц из области с большей их концентрации в область с меньшей их концентрации, т.е. движение частиц в неоднородной среде в направлении убывания их концентрации. Диффузия заряженных и нейтральных частиц происходит вследствие их хаотичного теплового движения. Поэтому, в отличие от тока, обусловленного полем, скорость диффузии тем выше, чем больше градиент концентрации ( $\text{grad } n$ ) и, чем выше средняя скорость теплового движения.

Направленное движение заряженных частиц само по себе вызывает возникновение или изменение согласованного электрического поля, которое, в свою очередь, также влияет на вызвавшее поле движение зарядов. Если  $n$ - концентрация частиц, являющаяся функцией только координат, то скорость диффузии:

$$v = -D \frac{1}{n} \text{grad } n, \quad (4.9)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии и подвижность заряженных частиц связаны **уравнением Эйнштейна**:

$$\frac{D_e}{u_e} = \frac{kT_e}{e_0}, \quad \frac{D_i}{u_i} = \frac{kT_i}{e_0}. \quad (4.10)$$

Следует отметить, что электрическое поле и диффузия направлены навстречу друг другу и компенсируют друг друга. В ряде случаев наблюдается совместное движение положительных ионов и электронов с равными скоростями дрейфа при равных концентрациях тех и других. Такое явление получило название **амбиполярной диффузии**.

**Наличие магнитного поля** изменяет значения подвижности и коэффициента диффузии и направление дрейфа. В частности, возможно спиралевидное движение заряженных частиц вокруг линий магнитного поля. Магнитное поле с напряженностью  $B$  уменьшает скорость дрейфа в направлении электрического поля в  $1/(1+u_e^2 B^2)$  раз и вызывает дрейф в направлении, перпендикулярном к электрическому и магнитному полям, со скоростью

$$\bar{v}_y = \frac{u_e^2 B E_x}{1 + u_e^2 B^2}. \quad (4.11)$$

### 4.1.3. Свойства газоразрядной плазмы

Газоразрядная плазма как транспортная среда, обеспечивающая функции переноса, характеризуется:

- переносом электрического заряда – *электропроводностью*;
- переносом энергии – *теплопроводностью*;
- переносом частиц – *коэффициентом диффузии*;
- передачей импульса – *вязкостью*.

Плотность электрического тока в соответствии с *законом Ома*:

$$J = e_0 n_e v_d = e_0 n_e u_e E = \gamma E, \quad (4.12)$$

где  $\gamma = e_0 n_e u_e$  – *проводимость плазмы*, пропорциональная плотности и подвижности электронов,  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . Она обратно пропорциональна плотности газа и определяется степенью его ионизации  $n_e / n$ . Поэтому температура и электронные столкновения вносят существенный вклад в электропроводность. На рисунке 4.9 показана зависимость электропроводности разных газов от температуры.

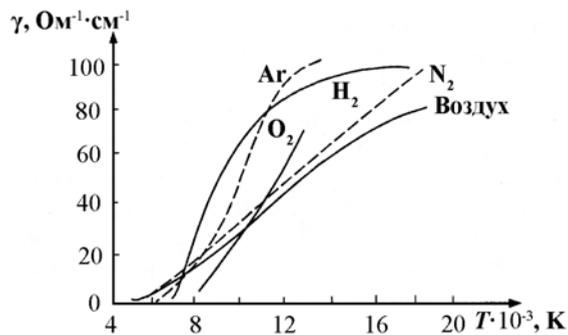


Рис. 4.9. Удельная электрическая проводимость некоторых газов

*Теплопроводность* – один из важнейших физических механизмов передачи энергии от плазмы в окружающую среду. В равновесной плазме устанавливается такая температура, при которой соблюдается баланс между джоулевым выделением тепла и передачей энергии из плазмы путем теплопроводности.

Уравнение теплопроводности в общем виде:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} + \text{div} \mathbf{q} = Q, \quad \mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad} T, \quad (4.13)$$

где  $\rho$  – плотность;  $c_p$  – изобарная теплоемкость;  $\mathbf{q}$  – плотность теплового потока;  $Q$  – плотность источников энергии;  $\lambda$  – теплопроводность.

Уравнение теплопроводности аналогично уравнению диффузии, причем роль коэффициента диффузии  $D$  играет параметр  $a = \lambda / (\rho c_p)$  называемый температуропроводностью. Теплопроводность нелинейно зависит от температуры, как видно из рис. 4.10 и практически не зависит от плотности и давления газа.

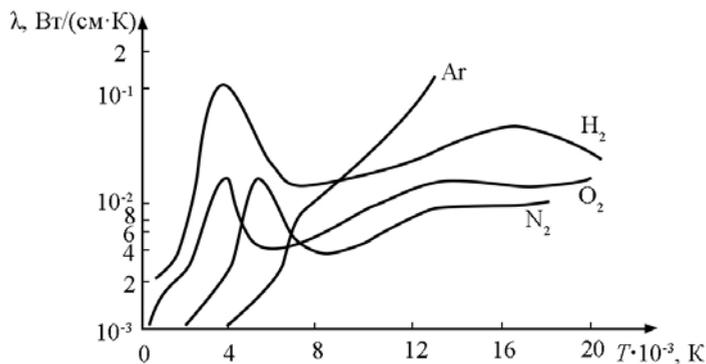


Рис. 4.10. Зависимость теплопроводности различных газов от температуры при атмосферном давлении

**Вязкость плазмы** проявляется главным образом в пограничных слоях и при теплопередаче к твердым стенкам. Зависимость вязкости различных газов от температуры приведена на рис. 4.11.

Над электроном, дрейфующим со скоростью  $v_d$  электрическое поле напряженностью  $E$ , совершает работу  $A = e_0 E v_d$ . В единице объема газа при протекании тока выделяется энергия в виде **джоулева тепла**  $\varepsilon = e_0 E v_d n_e$ . Джоулево тепло проявляется как диссипация энергии поля, вызванная существованием трения или сопротивления.

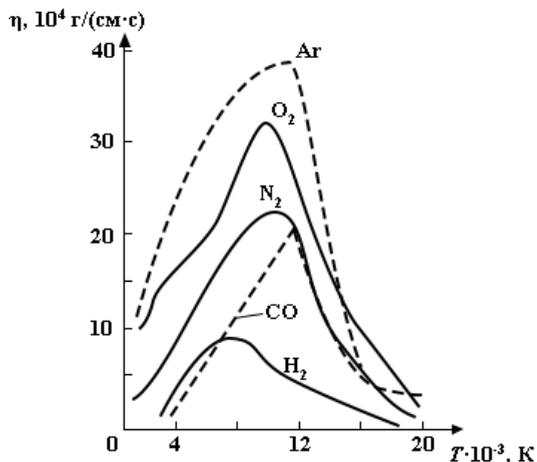


Рис. 4.11. Вязкость различных газов в зависимости от температуры

#### 4.1.4. Расчёт энергетических параметров стационарной электрической дуги постоянного тока

Расчет энергетических параметров дуги основан на решении системы уравнений, включающих уравнения баланса энергии (4.14), баланс сил (4.24), действующих на единичный объем столба, уравнения электромагнитного поля Максвелла и уравнения неразрывности. Решение такой системы уравнений возможно лишь в отдельных частных случаях. Ниже рассмотрены условия, позволяющие получить решение, полученные для дуги, горящей в атмосфере аргона, которая является распространенным видом электрической дуги, важным для практических приложений.

Столб вертикально горящей дуги в прилегающей к катоду зоне по форме представляет собой круглый усеченный конус, верхним основанием которого служит пятно привязки к катоду (рис. 4.12). При достаточной длине дуги конус плавно переходит в цилиндр, простирающийся до анода. Изменение длины межэлектродного промежутка сопровождается соответствующим увеличением или сокращением цилиндрического участка столба, примыкающего к аноду. Форма и размеры остальной части столба при этом не меняются. Рост тока дуги приводит к увеличению длины конусного или, как его принято называть, начального участка столба.

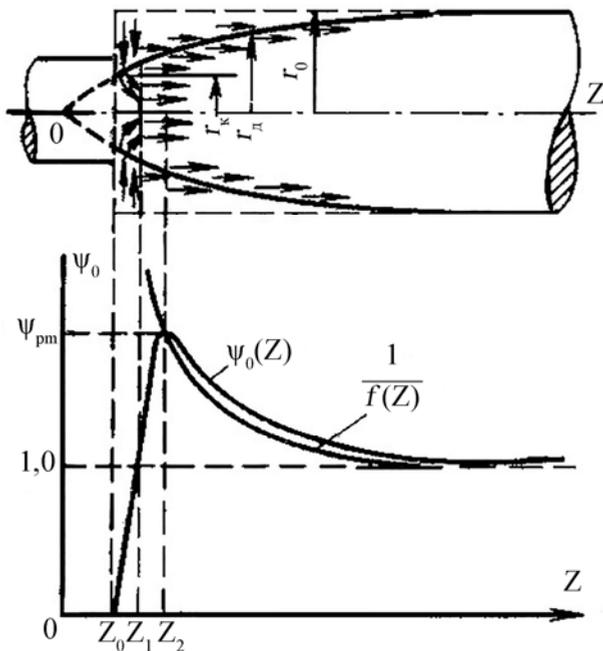


Рис. 4.12. Схема расчетной модели дуги

Температура  $T$  на оси дуги и напряженность  $E$  электрического поля максимальны у катода и на начальном участке столба, снижаются по направлению к аноду. В цилиндрической зоне столба эти параметры приближаются к некоторым предельным значениям.

**Газ в дуге движется по направлению от катода к аноду со скоростью, значительно превышающей скорость среды**, окружающей дугу. Осевая составляющая скорости движения газа  $U_z$  максимальна на оси дуги у катода и резко снижается в радиальном направлении, приближаясь на периферии столба к скорости окружающей среды  $U_{нар}$ . Снижение скорости в осевом направлении более плавное. Локальный расход газа  $\rho U_z$  при его движении в направлении оси во всём объёме столба меняется в относительно узком диапазоне. Увеличение тока дуги сопровождается ростом параметров  $U_z$  и  $\rho U_z$ , в то время как изменение скорости окружающей среды заметного влияния на эти параметры не оказывает.

**Радиус дуги  $r_d$**  на начальном участке растёт в направлении от катода к аноду от величины  $r_k$  в пятне привязки дуги к катоду до значения  $r_o$  в цилиндрической части столба. Коническая форма начального участка обусловлена различным характером процессов, определяющих радиус у катода и на удалении от него. Величина  $r_k$  определяется процессами на катоде, а радиус дуги в других сечениях зависит от условий теплообмена столба с окружающей средой. Рост радиуса на начальном участке дуги по направлению от катода к аноду приводит к снижению в этом направлении плотности тока и температуры газа. Другим следствием конической формы дуги является возникновение в столбе **осевой составляющей пондеромоторных сил** и градиента давления этих сил  $\frac{\partial P}{\partial z}$ , вызывающих

направленное движение газа в столбе. При этом начальный участок дуги уподобляется электромагнитному насосу, засасывающему газ из окружающего пространства и прогоняющему его через столб в направлении анода.

**Условия термодинамического равновесия** реализуются в дуге при давлениях окружающей среды порядка атмосферного и более высоких. При этом давление пондеромоторных сил в столбе оказываются величиной на два порядка меньшей, поэтому газ в дуге можно считать несжимаемым, а скорость его движения – меньшей, чем скорость звука. Кроме того, можно считать, что свойства газа являются функциями только температуры, а давление рассматривать в качестве параметра.

В условиях, при которых газ в дуге можно считать несжимаемым, его течение подобно течению жидкости. О характере движения жидкости можно судить на основании оценки относительной роли объёмных **сил инерции и вязкости**. Такая оценка была выполнена в работе [2] для областей на оси и периферии столба аргоновой дуги при скорости газа на оси  $U_{zo}$  порядка  $10^4$  см/с и скорости

окружающей среды  $U_{\text{нар}} = 10^3$  см/с. Например, по результатам оценки для дуги с радиусом  $r_d = 1$  см и температурой на оси  $T_o = 13000^\circ\text{K}$  объёмные силы инерции  $F_{\text{ин}}$  и силы вязкости  $F_v$  на оси дуги составляют:

$$F_{\text{ин}} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ Н/см}^3; \quad F_v = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Н/см}^3.$$

На периферии дуги, где  $U_z = U_{\text{нар}}$  при температуре  $T_1 = 6000^\circ\text{K}$ , соответствующей границе проводящей зоны дуги, резко снижается значение  $F_{\text{ин}}$ , а рассчитанная для условий оси величина  $F_v$  не изменяется. Там:

$$F_{\text{ин}} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/см}^3; \quad F_v = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ Н/см}^3.$$

Приведенная оценка позволяет сделать следующий вывод: вблизи оси дуги силы вязкости значительно меньше сил инерции, а на периферии столба силы вязкости и силы инерции соизмеримы. Оценка гравитационных сил в дуге показывает, что вблизи оси эти силы на два порядка меньше сил вязкости, поэтому гравитационными силами при дальнейшем рассмотрении можно пренебречь. Таким образом, движение газа в дуге оказывается сходным с общей картиной хорошо изученных явлений, имеющих место при движении маловязкой жидкости вблизи поверхности твёрдого тела. При таком движении у поверхности твёрдого тела образуется пограничный слой малой толщины, в пределах которого, как и на периферии дуги, силы вязкости и силы инерции имеют одинаковый порядок. По мере удаления от поверхности твёрдого тела скорость жидкости резко растёт. Сходство процессов в пограничном слое маловязкой жидкости вблизи поверхности твёрдого тела и на периферии дуги позволяет рассматривать внешние слои газа в столбе в качестве квазитвёрдой стенки радиуса  $r = r_d$ , отделяющей дугу от внешней среды и препятствующей неупорядоченному массообмену между окружающей средой и внутренней зоной столба.

Экспериментальные исследования течения газа во внешней зоне вблизи столба свидетельствуют о ярко выраженном там турбулентном характере движения. Что касается движения газа во внутренней зоне столба, то исследования [3,4] показали, что движение газа здесь носит ламинарный характер и консервативно, т.е. не зависит внешнего течения газа. *Расход газа в дуге* определяется производительностью электромагнитного насоса, которому можно уподобить начальный участок дуги.

В проводящей зоне столба локальный расход газа  $\rho U_z$  изменяется в относительно узком диапазоне. Это позволяет при решении уравнений (4.14) и (4.24) положить во всём объёме столба  $\rho U_z = \text{const}$ .

Поскольку газ в дуге движется в направлении её оси, теплопроводностью в осевом направлении по сравнению с конвекцией можно пренебречь. Иначе гово-

ря, при решении уравнения энергии принято, что  $\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \gg \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ , так что  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ .

На границе столба с окружающей средой в области температур  $\approx 6000^\circ\text{K}$  коэффициент теплопроводности  $\lambda$  снижается на порядок по сравнению со значениями, которые он имеет на оси. При таких условиях процесс теплопередачи из столба через поверхность  $r = r_d$  в окружающую среду определяется конвекцией, а теплопроводностью можно пренебречь.

Отношение  $c_p/\lambda$ , диапазон изменения которого при температурах дуги относительно узок, во всём объёме столба принимается постоянным.

В энергетическом балансе дуги существенную роль играет излучение. Процесс излучения в столбе рассматривается как объёмный, т.е. принимается, что самопоглощение излучения отсутствует.

С учётом изложенных допущений *уравнение баланса энергии* для проводящей зоны столба дуги в цилиндрических координатах можно представить в следующем виде:

$$\sigma(T)E^2 = W(T) + \rho U_z c_p \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (4.14)$$

где:  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  – соответственно удельная электропроводность, плотность, удельная изобарная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности газа, являющиеся функциями температуры и давления;  $W(T)$  – мощность, отводимая от единицы объёма газа посредством излучения.

Левая часть уравнения (4.14) отражают поступление энергии в дугу за счёт джоулева нагрева, правая часть – вынос энергии из столба излучением, конвекцией и теплопроводностью.

В процессе решения этого уравнения вводится функция теплопроводности

$$S = \int_0^T \lambda dT, \quad (4.15)$$

и в соответствии с законом Ома напряженность электрического поля  $E(z)$  выражается через ток дуги  $I$ :

$$E(z) = \frac{j_z}{\sigma} = \frac{\int_0^{r_a} 2\pi r j_z dr}{\int_0^{r_a} 2\pi r \sigma dr} = \frac{I}{\int_0^{r_a} 2\pi r \sigma dr}, \quad (4.16)$$

Нелинейные функции газа  $\sigma(S)$  и  $W(S)$  аппроксимируются представленными на рис. 4.13 прямыми.

$$\sigma^* = \begin{cases} 0 & \text{для } 0 < S \leq S_1; \\ B(S - S_1) & \text{для } S_1 < S \leq S_0, \end{cases}$$

$$W^* = \begin{cases} 0 & \text{для } 0 < S \leq S_1; \\ A(S - S_1) & \text{для } S_1 < S \leq S_0, \end{cases}$$

где  $S_0$  – значение функции  $S$  на оси дуги, а коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются согласно рис. 4.13 из условий равенства площадей соответствующих прямоугольных треугольников и криволинейных фигур:

$$A = \frac{2 \int_0^{S_0} W(S) dS}{(S_0 - S_1)}; \quad B = \frac{2 \int_0^{S_0} \sigma(S) dS}{(S_0 - S_1)}, \quad (4.17)$$

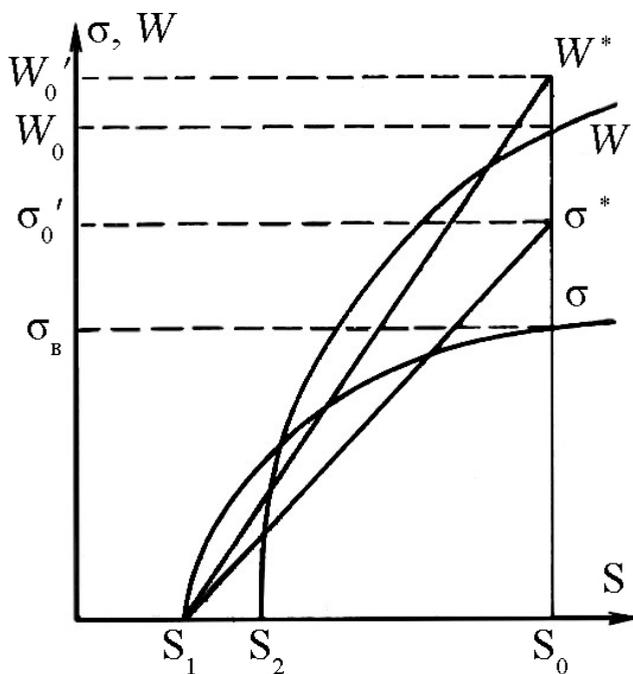


Рис. 4.13. Аппроксимация зависимостей  $\sigma(S)$  и  $W(S)$

На рисунке 4.14 представлены зависимости  $A(S_0)$  и  $B^{0.5}(S_0)$ , построенные по результатам численного расчёта интегралов в правых частях выражений (4.17). Использование этих зависимостей позволяет учесть в расчётах нелинейный характер функций  $\sigma(S)$  и  $W(S)$  при изменениях температуры на оси дуги, вызванных изменением режима её горения.

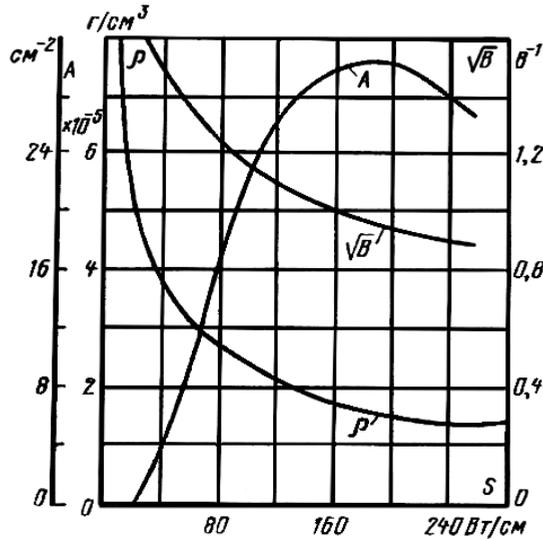


Рис. 4.14. Зависимость свойств газа от температуры (функции теплопроводности)

Форма прикатодной части столба дуги задаётся путём представления радиуса дуги как

$$r_d = r_0 \cdot f(z), \tag{4.18}$$

где функция  $f(z)$  представляет собой экспоненту

$$f(z) = \left[ 1 - e^{-\frac{2(A_0 r_0^2 + \gamma_1^2)}{r_0^2 \rho U_z \frac{C_p}{\lambda}} z} \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{4.19}$$

где  $\gamma_1 = 2,405$  – первый корень функции Бесселя нулевого порядка первого рода  $J_0(x_i)$ ;  $r_0$  и  $A_0$  соответственно значения радиуса дуги  $r_d$  и функции  $A(S_0)$  в цилиндрической зоне столба дуги.

В соответствии с принятыми допущениями исходное уравнение энергии (4.14) принимает вид:

$$\frac{I^2 \bar{S}}{B \left[ \int_0^{r_a} 2\pi r \bar{S} dr \right]^2} = A_0 \bar{S} \frac{r_0^2}{r_0^2} + \rho U_z \frac{C_p}{\lambda} \frac{\partial \bar{S}}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{S}}{\partial r} \right), \quad (4.20)$$

а его решение получено в виде

$$\bar{S} = \bar{S}_\infty \psi_0(z) J_0(\gamma_1 \bar{r}). \quad (4.21)$$

Здесь:  $\bar{r} = \frac{r}{r_0}$ ;  $\bar{S} = (S - S_1)$ ;

$S_1$  – значение функции  $S$  на периферии столба дуги, где  $r = r_d$

$$\bar{S}_\infty = \frac{\gamma_1}{2\pi J_1(\gamma_1) B^{\frac{1}{2}} (A_0 r_0^2 + \gamma_0^2)^{\frac{1}{2}} r_0} \frac{I}{r_0} - \text{значение функции } S \quad (4.22)$$

на оси дуги при  $z \rightarrow \infty$ ;

$J_1(\gamma_1)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка;

$$\psi_0(z) = \left[ \frac{1 - f^2(z)}{f^2(z)} \ln \frac{f^2(z)}{1 - f^2(z)} + \frac{1 - f^2(z)}{f^2(z)} C_1 + 1 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$C_1 = \ln \frac{1 - \bar{r}_k^2}{\bar{r}_k^2} - \frac{\bar{r}_k^2}{1 - \bar{r}_k^2}; \quad \bar{r}_k = \frac{r_k}{r_0};$$

$r_k$  – радиус столба дуги на катоде.

Функции  $f(z)$  и  $\psi_0(z)$  графически представлены на рис. 4.12.

Из выражения (4.21) после ряда преобразований для напряжения дуги  $V$  получено выражение

$$V = \frac{\rho U_z \frac{C_p}{\lambda} r_0 \ln \frac{2}{1 + \bar{r}_k}}{B^{\frac{1}{2}} (A_0 r_0^2 + \gamma_1^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{(A_0 r_0^2 + \gamma_1^2)^{\frac{1}{2}} l}{B^{\frac{1}{2}} r_0}, \quad (4.23)$$

Здесь  $l$  – известная из исходных условий длина дуги. В этом выражении остаются неизвестными локальный расход газа в дуге  $\rho U_z$  и радиус дуги в цилиндрической зоне столба  $r_0$ .

Рассмотрим уравнение, отражающее баланс сил, действующих на единичный объём столба равновесной электрической дуги:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{U}}{\partial \tau} + \rho \bar{U} \text{grad} \bar{U} = \rho \bar{g} - \text{grad} P + \mu [\bar{j} \bar{H}] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu_v \left( \frac{\partial \bar{U}}{\partial x_i} + \text{grad} \bar{U}_i \right) \right] - \frac{2}{3} \text{grad} (\mu_v \text{div} \bar{U}_i), \end{aligned} \quad (4.24)$$

в котором  $T$  и  $\bar{U}$  – температура и скорость движения газа;  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\mu_v$ , – соответственно удельная электропроводность, магнитная проницаемость, динамическая вязкость газа,  $\bar{j}$  – плотность тока,  $\bar{H}$  – и напряженность магнитного поля;  $\bar{g}$  – ускорение силы тяжести;  $\tau$  – время;  $x_i, i$  – координаты.

Члены в левой части уравнения (4.24) отражают влияние сил инерции. Остальные члены этого уравнения учитывают последовательно влияние гравитационных сил, сил внутреннего давления, пондеромоторных сил, обусловленных собственным магнитным полем дуги, и сил вязкости.

Во всём объёме столба коэффициент динамической вязкости  $\mu_v$  принимается постоянным и равным его значению на оси дуги при координате  $z$ , стремящейся к бесконечности.

При учёте сил вязкости в уравнении движения принимается  $\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} \gg \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}$ , так что  $\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} = 0$ .

В результате решения уравнения движения газа в дуге (4.24) получено соотношение для локального расхода газа  $\rho U_z$  в столбе дуги в виде функции от тока, радиуса и длины дуги:

$$\rho U_z = \left[ \frac{\gamma_1 \mu_0 I^2}{16 \pi^2 J_1(\gamma_1) r_0^2} \rho_\infty F_0(l) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.25)$$

где  $\rho_\infty$  – плотность газа на оси бесконечно длинной дуги;

$$F_0(l) = \frac{\ln f^2(l) - \ln \bar{r}_k^2}{f^2(l)}; \quad f(l) = f(z)_{\text{при } z=l}.$$

Радиус дуги  $r_0$  находится как результат рассмотрения условий теплообмена дуги с окружающей атмосферой в рабочем пространстве печи. Согласно расчётной «канальной» модели дугу можно уподобить стержню, омываемому снаружи потоком газа. Джоулево тепло, отводимое теплопроводностью внутри стержня в радиальном направлении, подводится к его поверхности, где путём

естественной конвекции рассеивается в окружающую среду. Условия теплообмена на границе столба при  $z \rightarrow \infty$

$$-\frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{\substack{r=r_0 \\ z \rightarrow \infty}} = \alpha(T_1 - T_{\text{нар}}) = q,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $T_{\text{нар}}$  – температура среды, окружающей дугу,  $q$  – удельный тепловой поток, отводимый в окружающую среду.

С учётом изложенного выше

$$r_0 = \gamma_1 J_1(\gamma_1) \frac{\bar{S}_\infty}{q}. \quad (4.26)$$

При расчётах теплоотвода от цилиндрической части столба электрической дуги в условиях естественной конвекции справедливо критериальное уравнение [4, 5]:

$$Nu = C(Gr)^{\frac{1}{3}}(Pr)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.27)$$

в котором безразмерный коэффициент  $C = 3$ , а  $Nu$ ,  $Gr$  и  $Pr$  соответственно критерии теплообмена Нуссельта, Грасгофа и Прандтля.

При подстановке в это уравнение параметров, входящих в критерии, получаем формулу для удельного теплового потока

$$q = 3\lambda g^{\frac{1}{3}} \beta^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{\rho}{\mu_v} \right)^{\frac{2}{3}} (Pr)^{\frac{1}{2}} (T_1 - T_{\text{нар}})^{\frac{4}{3}}, \quad (4.28)$$

где  $\beta$  – коэффициент объёмного расширения газа.

На рисунке 4.15 представлена полученная расчётом по формуле (4.28) зависимость *отводимого от дуги удельного теплового потока* от температуры газа, окружающего дугу в рабочем пространстве печи. Анализ полученной зависимости показывает, что при неизменных токе и длине дуги, рост температуры в рабочем пространстве печи приводит к снижению отводимого в это пространство удельного теплового потока, вследствие чего в соответствии с соотношением (4.26) увеличивается радиус дуги  $r_0$  и, как следствие, снижаются плотность тока в столбе, сопротивление и напряжение дуги.

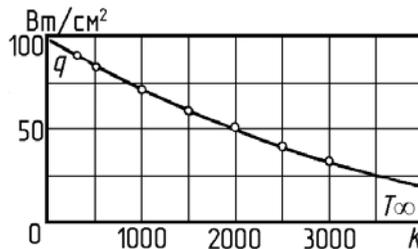


Рис. 4.15. Зависимость удельного теплового потока  $q$  от температуры окружающей среды  $T_\infty$

При изменении параметров дуги меняются соотношения между *составляющими мощности, передаваемой в дуге проходящему через нее газу  $P_{г*}$ , теплопроводностью  $P_{т*}$  и излучением  $P_{л*}$* . На рисунке 4.16 показана зависимость вклада указанных составляющих в общую мощность дуги от тока аргоновой дуги при разной ее длине: а) 200мм, б) 50 мм.

Расчёт напряжения дуги можно существенно упростить, если воспользоваться приближенным соотношением:

$$\frac{2(A_0 r_0^2 + \gamma_1^2)}{r_0 \rho U_z \frac{C_p}{\lambda}} = 0,5 \pm 0,1 \approx \text{const}.$$

Используя это соотношение, а также выражение (4.22) можно найти, что

$$V = \frac{2\pi J_1(\gamma_1)}{\gamma_1} (A_0 r_0^2 + \gamma_1^2) \bar{S}_\infty \frac{r_0}{I} \left[ \frac{l}{r_0} + 4 \ln \frac{2}{1 + \bar{r}_k} \right]. \quad (4.29)$$

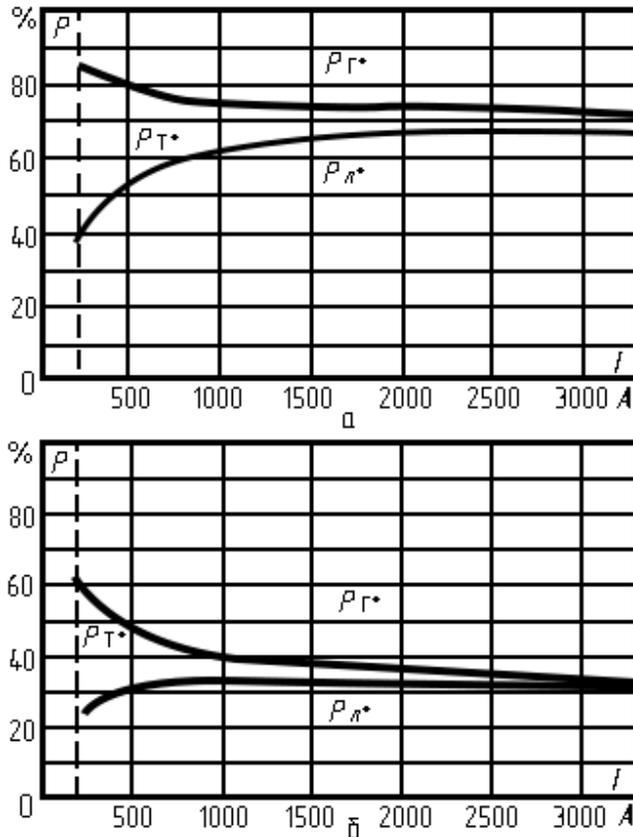


Рис. 4.16. Вклад в общую мощность дуги от тока аргоновой дуги составляющих, за счет конвекции  $P_{г*}$ , теплопроводности  $P_{т*}$  и излучения  $P_{л*}$

При вариации исходных данных, в пределах, представляющих практический интерес, параметр  $4 \ln \frac{2}{1 + \bar{r}_k}$  изменяется в очень узком интервале и может быть принят за константу. Параметры  $r_0$ ,  $\bar{S}_\infty$  и  $A_0$  являются функциями тока  $I$  и температуры окружающей среды  $T_{\text{нар}}$ .

Поэтому для практических расчётов удобно отразить зависимость этих параметров от тока в виде аппроксимаций вида

$$r_0 = C_1 I^{\beta_1}; \quad \bar{S}_\infty = C_2 I^{\beta_2}; \quad (A_0 r_0^2 + \gamma_1^2) = C_3 I^{\beta_3}, \quad (4.30)$$

а зависимость параметров от температуры окружающей среды  $T_{\text{нар}}$  отразить в виде аппроксимаций:

$$\begin{aligned} C_i &= D_1 T_{\text{нар}} + D_2 (T_{\text{нар}})^2 + D_3 (T_{\text{нар}})^3; \\ \beta_i &= E_1 T_{\text{нар}} + E_2 (T_{\text{нар}})^2 + E_3 (T_{\text{нар}})^3. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Тогда для **напряжения столба дуги** вместо формулы (4.29) получается выражение вида

$$V = C_n I^{\beta_n} + C_m I^{\beta_m},$$

а для **напряжения дуги**

$$U = \Delta U_{\text{эл}} + C_n I^{\beta_n} + C_m I^{\beta_m}. \quad (4.32)$$

Член  $\Delta U_{\text{эл}}$  в правой части уравнения (4.32) отражает сумму **приэлектродных падений напряжения**, член  $C_n I^{\beta_n}$  – **падение напряжения на начальном коническом участке дугового столба**, и член  $C_m I^{\beta_m}$  – **падение напряжения на остальном цилиндрическом участке столба**.

Уравнения (4.30)÷(4.32) дают хорошее совпадение с экспериментальными данными для дуги с вольфрамовым катодом и стабильной в пространстве формой, горящей в атмосфере аргона применительно к условиям работы плазменной печи.

В современной дуговой печи постоянного тока электрическая дуга горит с графитового катода. Катодное пятно дуги непрерывно перемещается по рабочему торцу катода. Столб дуги может иметь форму спирали с переменным числом витков, которая вращается вокруг продольной оси. Атмосфера, в которой горит дуга, помимо воздуха содержит пары углерода, его оксидов, а также паров шлака и оксидов расплавляемых металлов. Применительно к таким условиям теоретический расчёт дуги наталкивается на непреодоленные в настоящее время сложности.

Тем не менее для практических расчетов принято, что основные процессы, определяющие энергетический режим дуги в печах постоянного тока, аналогичны рассмотренной выше плазменной дуге. Соответственно, аналогична и структура зависимости напряжения на дуге от ее параметров.

В работе [6] на основе анализа режимов промышленных дуговых печей постоянного тока предложены эмпирические коэффициенты для уравнения, имеющего такую же структуру, как и (4.32), принятая далее, как *статическая модель дуги постоянного тока*:

$$U = 10 + B \cdot I^\alpha + A \cdot L \cdot I^{\alpha-0,5}, \quad (4.33)$$

где  $U$  – напряжение дуги, В,

$I$  – ток дуги, А,

$L$  – длина дуги (расстояние от рабочего торца электрода до поверхности ванны), м;

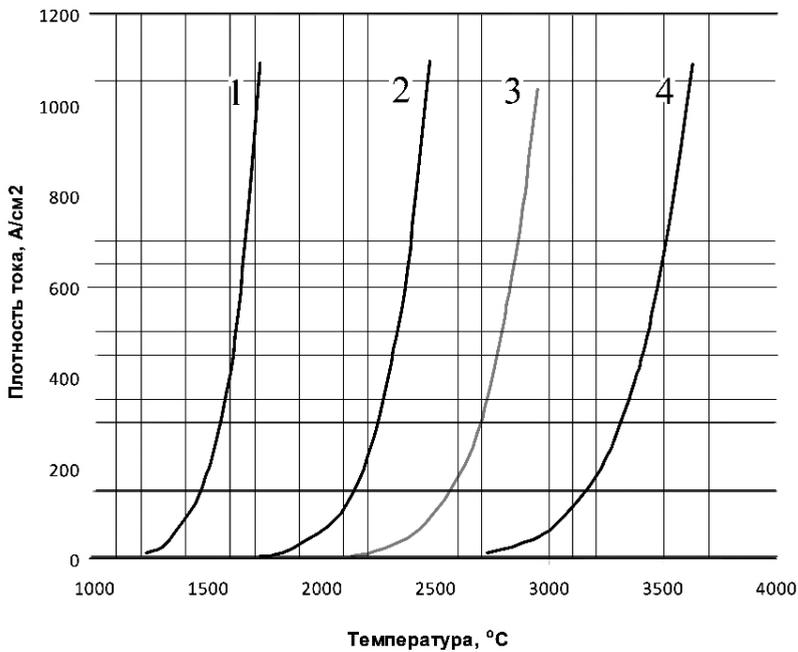
$$\begin{aligned} A &= 3130 - 5650 \cdot T + 4565 \cdot T^2 - 1215 \cdot T^3; \\ B &= 1,3 - T^2; \quad \alpha = 0,47 + 0,03 \cdot T^2; \end{aligned} \quad (4.34)$$

$T = T_m / T_{\max}$ ;  $T_m$  – текущая температура металла,  $T_{\max}$  – максимальная температура жидкого металла в процессе плавки.

#### **4.1.5. Температура и плотность тока на рабочем торце графитированного электрода, служащего катодом электрической дуги**

**Плотность тока в пятне привязки дуги на катоде  $J_e$** , может быть определена на основании закона Ричардсона-Дэшмана (4–1). Если известна фактическая плотность тока в пятне привязки дуги на катоде  $J_e$  и работа выхода электронов для материала катода  $\phi_e$ , то соотношение (4.1) методом последовательных приближений позволяет рассчитать температуру материала катода под пятном дуги. Результаты таких расчётов представлены на рис. 4.17, откуда следует, что, например, при величине работы выхода электронов для материала катода  $\phi_e = 2,9$  эВ возможный диапазон плотности тока в пятне дуги на катоде от 10 до 1100 А/см<sup>2</sup> может быть реализован в диапазоне температур поверхности катода под пятном дуги  $T = 1750 \div 2500^\circ\text{C}$ , а при  $\phi_e = 4,34$  эВ – в диапазоне температур  $T = 2750 \div 3650^\circ\text{C}$ . Следовательно, от химического состава материала катода, ввиду изменения работы выхода электронов, существенно зависят условия обеспечения устойчивого горения дуги, энергетический баланс и температура катода.

Для оценки реальной плотности тока под пятном дуги на рабочем торце электрода использованы результаты экспериментов на промышленной дуговой печи постоянного тока вместимостью 12 т.



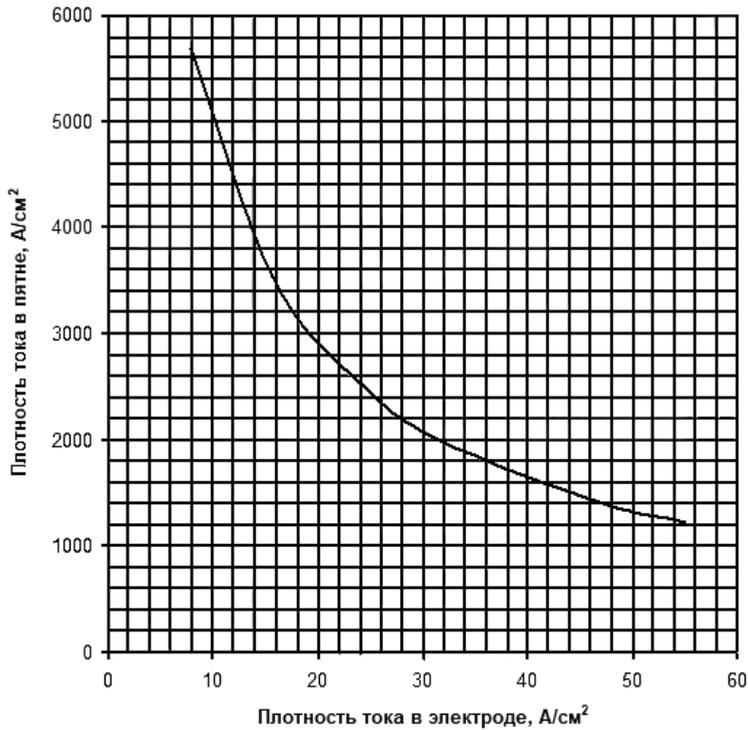
1 -  $\varphi_3=2,0\text{эВ}$ ; 2 -  $\varphi_3=2,9\text{эВ}$ ; 3 -  $\varphi_3=3,5\text{эВ}$ ; 4 -  $\varphi_3=4,34\text{эВ}$

**Рис. 4.17.** Плотность тока в катодном пятне

Исследование процесса горения дуги выполнялось с помощью скоростной киносъёмки с использованием светофильтров, позволяющих разделить излучения столба дуги и плазмы паров графита, поскольку интенсивное излучение столба дуги и плазмы паров графита находятся в различных спектральных областях. Визуальные наблюдения за процессом горения дуги показывают, что поведение пятна привязки дуги на рабочем торце графитированного электрода (катода) меняется в зависимости от величины тока дуги. При очень низких значениях тока в электроде пятно неподвижно. С ростом тока наблюдаются перемещения пятна привязки дуги. Эти перемещения пятна носят скачкообразный характер и осуществляются путём образования новых и отмирания старых каналов проводимости. При росте плотности тока в электроде свыше  $30\text{А/см}^2$  увеличивается разогрев всей торцевой поверхности электрода, резко повышается скорость перемещения пятна по поверхности и возрастает испарение графита, приводящее к образованию облака плазмы паров графита вблизи поверхности. Результаты обработки данных, полученных в результате исследований с помощью киносъёмки пятна дуги, представлены в табл. 4.1 и на рис. 4.18.

Таблица 4.1

Ток дуги $I$ , кА	Скорость съёмки, кадров/сек	Диаметр пятна привязки дуги на электроде, $d_n$ , мм	Плотность тока в пятне привязки дуги, $J_n$ , А/см <sup>2</sup>	Плотность тока в электроде, $J_s$ , А/см <sup>2</sup>	Условная скорость дви- жения пятна, $V$ , м/сек
2	3400	6,7	5680	7,86	22,9
4	2900	12,0	3540	15,7	26,1
6	3100	17,2	2580	23,6	42,9
8	–	22,5	2010	31,4	–
12	2100	33,0	1400	47,2	59,4
14	–	38,0	1230	55,0	–



**Рис. 4.18.** Зависимость плотности тока  $J_n$  в пятне привязки дуги на рабочем торце серийного графитированного электрода от средней плотности тока  $J_s$  в электроде

Согласно приведенным выше результатам исследований плотность тока в пятне привязки дуги на рабочем торце электрода  $J_n$  снижается по мере роста тока дуги и соответствующего увеличения плотности тока  $J_s$  в поперечном сечении электрода. Этому факту можно дать следующее объяснение. В переходе электрического тока от электрода в дугу участвуют два процесса: термоэлектронная эмиссия материала катода, протекающая с затратой энергии и обеспечивающая переход электронов с поверхности катода в дугу и ионная бомбардировка катода положительно заряженными ионами, приходящими на катод из плазмы дуги с выделением тепла при высокой плотности ионной составляющей тока. С ростом тока дуги автоматически меняется баланс энергии, приходящей из дуги на катод: возрастает средняя температура рабочего торца катода, вследствие чего увеличивается доля тока электронной эмиссии, снижается доля ионной составляющей тока и, в конечном итоге, согласно (4.1) и зависимости, приведенной на рис. 4.6, снижаются плотность тока в пятне дуги на катоде, и температура поверхности катода под пятном.

#### 4.1.6. Радиус анодного пятна печной дуги

**Радиус  $r_a$  анодного пятна печной дуги постоянного тока** является функцией тока дуги  $I$  и среднemasсовой температуры материала  $T_m$ , подвергаемого плавке в печи.

В работах [2,4] спектральными методами выполнены измерения температуры плазмы по длине и сечению столба дуги, открыто горящей в атмосфере аргона на постоянном токе до уровня 1200 А. Полученные результаты были затем использованы при подборе светофильтров и фотографировании токопроводящей зоны дуги. Путём обработки этих фотографий было установлено, что начальный участок дуги имеет конусную форму; были определены наружные размеры дуги как функции тока и температуры материала в анодном пятне дуги.

По результатам этих измерений можно сделать вывод, что для печных дуг постоянного тока можно аппроксимировать зависимость радиуса столба дуги  $r_d$  от тока дуги  $I$  эмпирическим соотношением

$$r_d(I, T_m) = 0,217 \cdot I^{0,5} / A(T_m), \quad (4.35)$$

где величина  $A(T_m)$  описывается соотношением (4.34).

Зависимость (4.35) графически представлена на рис. 4.19.

Как показано на рис.4.19, радиус дуги  $r_a$  в соответствии с выражением (4.35) возрастает пропорционально величине тока в степени 0,5. Согласно данным, представленным на этом рисунке, при уровне тока 36 000 А и при росте температуры  $T_m$  в интервале (200÷1800)°С радиус анодного пятна  $r_a$  возрастает от 16 до 50 мм, т.е. более чем в 3 раза.

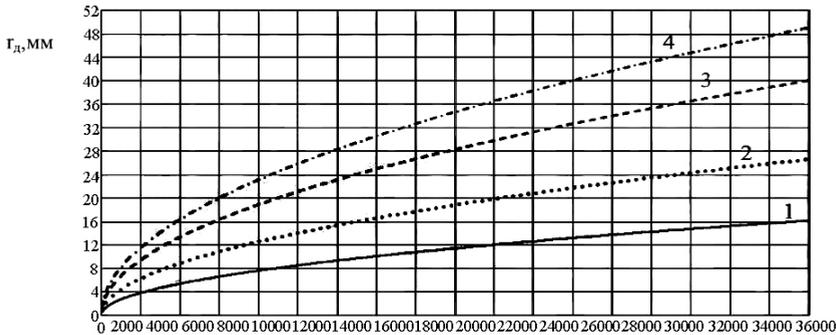


Рис. 4.19. Зависимость радиуса  $r_d$  печной дуги длиной 400 мм от тока дуги  $I$  при вариациях средней температуры  $T_m$  металла в печи:  
1–200°C, 2–700°C, 3–1200°C, 4–1700°C

#### 4.1.7. Расчёт давления электромагнитных сил в столбе дуги постоянного тока

В электрической дуге **лоренцевы силы** перпендикулярны как вектору плотности тока  $J_z$ , так и вектору напряжённости магнитного поля  $H_\phi$ . В случае цилиндрической дуги линии тока параллельны оси дуги, а лоренцевы силы направлены радиально по отношению к оси дуги.

В этом направлении в дуге не может возникнуть стационарное течение плазмы, вследствие чего там создаётся **поле избыточных давлений**  $P(r)$ , градиент которого компенсирует силы Лоренца. В этом случае **уравнение движения плазмы дуги** приобретает вид:

$$-\frac{dP}{dr} + \mu_0 J_z H_\phi = 0. \quad (4.36)$$

После интегрирования по радиусу дуги с учетом данных по распределению плотности тока в сечении столба дуги, а также используя закон полного тока, получены выражения для распределения давления  $P(r')$  в поперечном сечении столба дуги и давления  $P_{r'=0}$  на оси дуги:

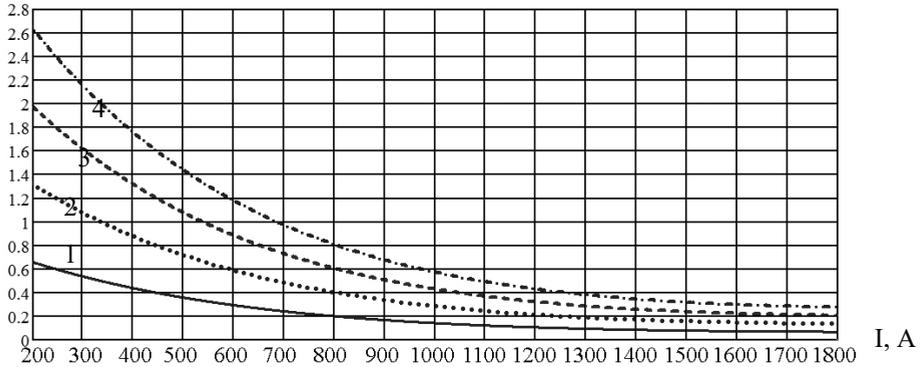
$$P(r') = 10^{-12} \cdot I_d J_d \left( \frac{5}{3} - 4r'^2 + 3r'^4 - \frac{2}{3}r'^6 \right), \text{ бар}, \quad (4.37)$$

$$P_{r'=0} = 10^{-12} \cdot \frac{5}{3} \frac{I_d^2}{\pi r_d^2} = 10^{-12} \cdot \frac{5}{3} I_d, \text{ бар}, \quad (4.38)$$

где  $r' = \frac{r}{r_d}$  – радиус дуги в относительных единицах;  $I_d$  – ток, А;  $J_d$  – плотность тока в дуге, А/м<sup>2</sup>.

Выражение (4.37) графически представлено на рис. 4.20 и рис. 4.21.

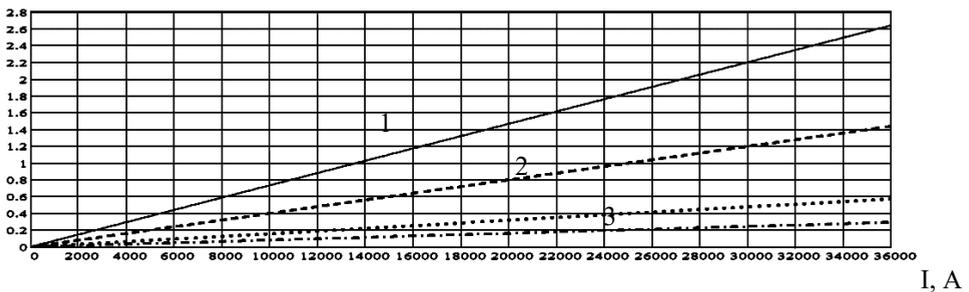
$P$ , бар



**Рис. 4.20.** Зависимость избыточного давления  $P$  на оси дуги от среднемассовой температуры расплавляемой шихты  $T_m$  ( $T_{\max} = 1800^\circ\text{C}$ ) при вариациях тока дуги  $I_d$ :  
1–9 000 А, 2–18 000 А, 3–27 000 А, 4–36 000 А

Поскольку средняя плотность тока в столбе дуги  $J_d$  не зависит от тока, на этих рисунках видна линейная зависимость давления  $P$  от тока и существенно нелинейная зависимость этого давления от среднемассовой температуры шихты  $T_m$ .

$P$ , бар



**Рис. 4.21.** Зависимость избыточного давления  $P$  на оси печной дуги от тока дуги  $I$  ( $T_{\max} = 1800^\circ\text{C}$ ) при вариациях среднемассовой температуры расплавляемой шихты  $T_m$ :  
1–200°C, 2–500°C, 3–1000°C, 4–1600°C

Выражение (4.37) для распределения избыточного давления электромагнитных сил («пинч-эффект») по радиусу дуги графически представлено на рис. 4.22.

$P$ , бар

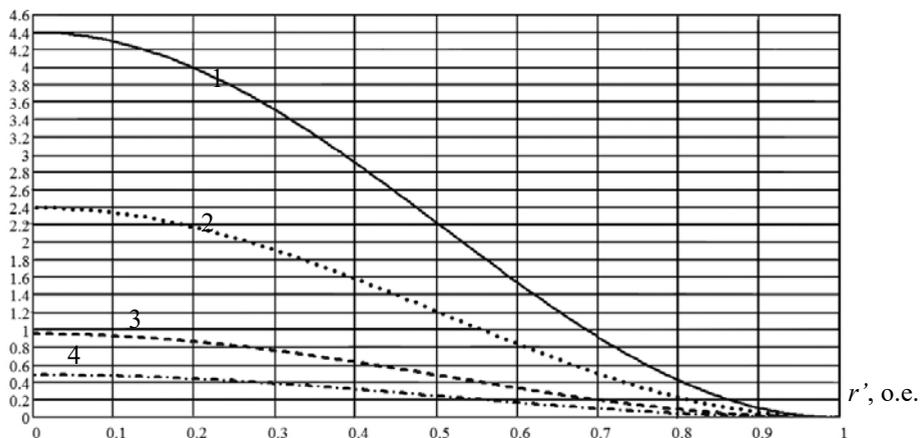


Рис. 4.22. Распределение избыточного давления  $P$  по относительному радиусу  $r'$  столба дуги при вариациях среднemasовой температуры расплавленной шихты  $T_m$ : 1–200°C, 2–500°C, 3–1000°C, 4–1600°C

#### 4.1.8. Мощность и удельный тепловой поток, поступающие на анод электрической дуги постоянного тока

Величины мощности электрической дуги постоянного тока, а также **мощности, передаваемой расплавленному металлу через анодное пятно дуги**, рассмотрены в ряде работ [2, 3, 5, 6]. Согласно [3] в подводе энергии к поверхности металла в зоне анодного пятна дуги участвуют следующие процессы.

1. Конвективная теплоотдача от горячей плазмы через пограничный слой. Эта составляющая включает тепло, выделяющееся в пограничном слое.

2. Лучистая теплоотдача от дуги.

3. Кинетическая энергия электронов, соударяющихся с поверхностью анода (ток дуги).

4. Энергия электронов (работа выхода), проникающих через поверхность анода.

В работе [5] исследовался процесс теплопередачи на аноде сильноточной (до 1200 А) дуги постоянного тока в атмосфере аргона. Анодом служила водоохлаждаемая медная пластина. Мощность, передаваемая дугой в пластину, непосредственно измерялась путём калориметрирования. Результаты этих измерений с относительной погрешностью до 10% описываются соотношением

$$P_a = \eta_a \cdot P_d \quad (1.6), \quad (4.39)$$

где  $P_d = U \cdot I$  и  $P_a$  соответственно мощность дуги и мощность, передаваемая из дуги в анод.

Выше в (4.33) приведено соотношение, позволяющее определить напряжение дуги  $U$  при известном токе, длине дуги и температуре процесса. Доля мощности дуги, передаваемая в анод  $\eta_a$ , в формуле (4.39) может быть аппроксимирована гиперболой вида

$$\eta_a = 10^2 / (8 \cdot L' + 155), \quad (4.40)$$

где относительная длина дуги  $L' = L/r_d$  ( $L$  – длина дуги, мм;  $r_d$  – радиус столба дуги в анодном пятне, мм).

После преобразований (4.40) с учетом (4.34) и выражения (4.35) для  $r_d(I, T_m)$  определим

$$\eta_a = 0,645 \cdot I^{0,5} / (I^{0,5} + 0,2373 \cdot L \cdot A). \quad (4.41)$$

Мощность, передаваемая из дуги в материал анода

$$P_a = P_d \cdot \eta_a = 0,149 \cdot U \cdot I^{1,5} / [I^{0,5} + 0,2373 \cdot L \cdot A]. \quad (4.42)$$

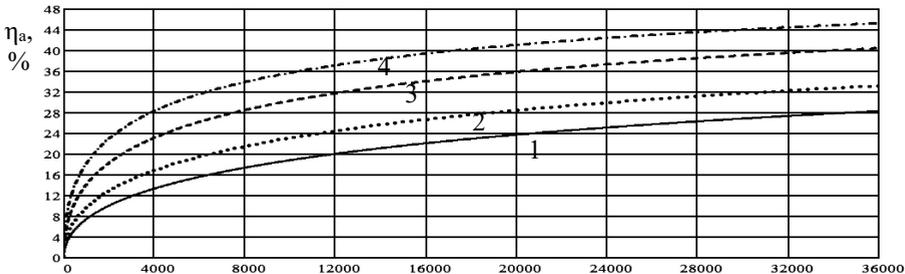
Удельный тепловой поток в анодном пятне дуги

$$\psi_a = P_a / \pi \cdot r_a^2. \quad (4.43)$$

С учётом выражения (4.35) для радиуса столба дуги в анодном пятне дуги

$$\psi_a = 4,34 \cdot U \cdot A^2 \cdot I^{0,5} / [I^{0,5} + 0,2373 \cdot L \cdot A], \text{ Вт/м}^2. \quad (4.44)$$

На рисунке 4.23 в графической форме представлена зависимость параметра  $\eta_a$  от величин тока дуги  $I$  и среднemasовой температуры шихты  $t_m$  в процессе её расплавления.



**Рис. 4.23. Зависимость переданной на анод относительной доли  $\eta_a$  мощности дуги длиной 0,4 м от тока  $I$  дуги при вариациях среднemasовой температуры расплавления шихты  $T_m$ : 1–200°C, 2–500°C, 3–1000°C, 4–1650°C**

#### 4.1.9. Дуга переменного тока

Упрощенная *схема электрической цепи однофазной дуги* показана на рис. 4.24 а. В большинстве дуговых печей переменного тока при синусоидальном напряжении питающей сети напряжение на дуге и ее ток по форме отличаются от синусоиды, как видно из осциллограммы тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$ , приведенной на рис. 4.24 б.

Наибольшая *несинусоидальность тока и напряжения* наблюдается при открыто горящих дугах, как в дуговых сталеплавильных печах. При переходе тока дуги через нуль (при изменении полярности питающего напряжения) дуга загорается при достижении питающим напряжением значения равного **напряжению зажигания дуги**. В течение некоторой части периода, пока напряжение не достигло этого значения, ток через дуговой промежуток не протекает. Во время *паузы тока* и при его снижении в конце полупериода степень ионизации в дуговом промежутке снижается, что приводит к повышению электрического сопротивления дугового промежутка. При этом в кривой напряжения на дуге наблюдаются **пики зажигания и погасания дуги**. Форма кривых тока и напряжения дуги, характер горения дуги и ее устойчивость зависят от величины питающего напряжения и его частоты, величины тока, длины и интенсивности теплообмена дуги с окружающим пространством, активного и индуктивного сопротивления токоподвода к дуге.

Если аппроксимировать форму напряжения однофазной дуги прямоугольной кривой, то при нулевой индуктивности цепи ( $L = 0$ ) кривая мгновенных значений тока дуги будет иметь вид срезанных вершин синусоиды, как на рис. 4.24 в, на котором полярность напряжения дуги  $u_d$  условно изменена на противоположную. Принято, что питание дуги с последовательно включенным активным сопротивлением  $r$  осуществляется от источника синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$ . При  $|u| < |u_d|$  до момента зажигания  $\omega t < \omega t'$  и после ее погасания  $\omega t > \omega t''$  ток дуги отсутствует. Расчетное значение тока дуги в остальной части периода определяется выражением

$$i_d = (U_m \sin \omega t - u_d) / r. \quad (4.45)$$

Если в цепи однофазной дуги, кроме активного сопротивления  $r$ , включена индуктивность  $L \neq 0$  (как показано на рис. 4.24 а), то для расчета мгновенных значений тока необходимо решить уравнение Кирхгофа для промежутка времени горения дуги:

$$U_m \sin \omega t - u_d = ir + x \frac{di}{d\omega t}, \quad (4.46)$$

здесь  $x di/d\omega t = L di/dt$  – падение напряжения на индуктивном сопротивлении в цепи дуги.

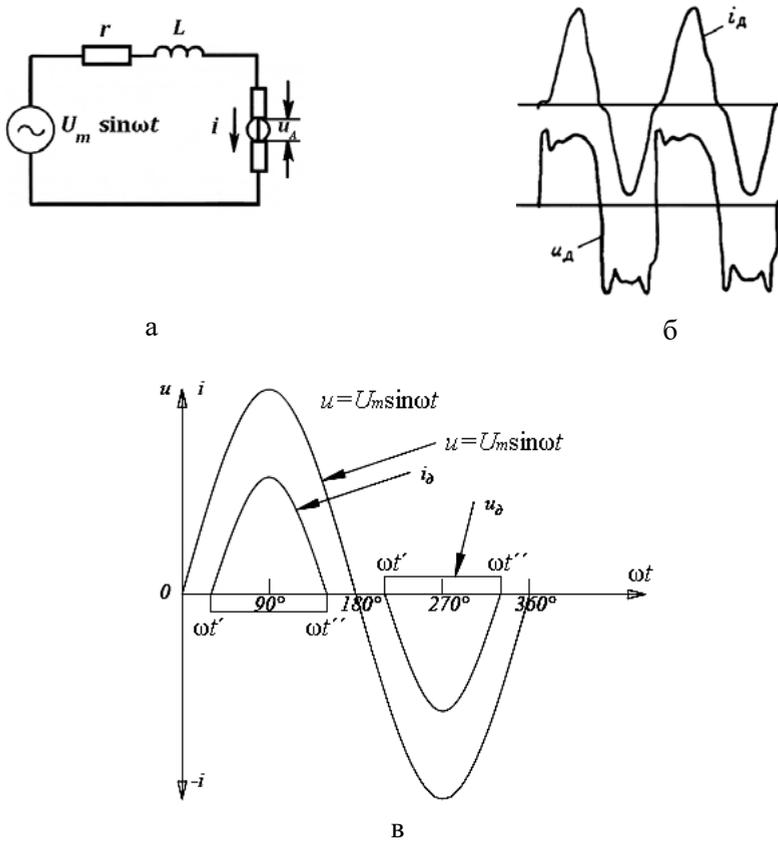


Рис. 4.24. Схема цепи с однофазной дугой – а, осциллограмма тока и напряжения открыто горящей дуги – б и ее аппроксимация – в

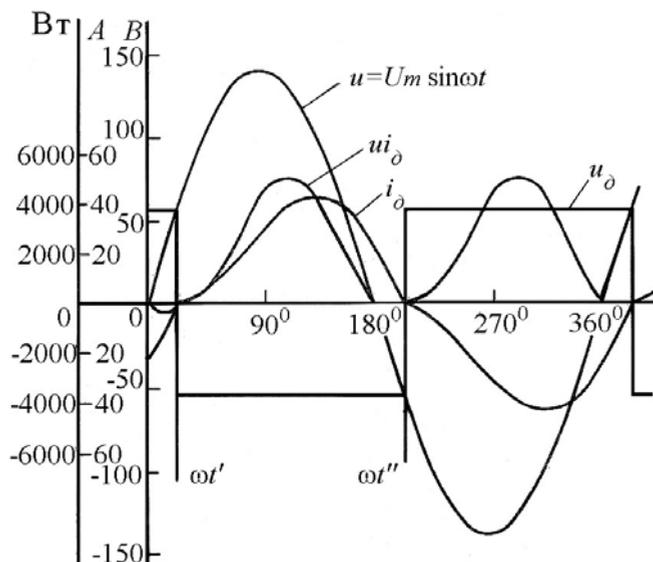
Уравнение (4.46) имеет аналитическое решение [1], в соответствии с которым на рис. 4.25 построены кривые мгновенных значений тока  $i_d$ , напряжения  $u_d$  и мощности  $u i_d$  малоэнергетической дуги:

$$i = \frac{U_m}{z} \left[ C e^{-\omega t \cos \varphi} + \sin(\omega t - \varphi) - \frac{u_d}{U_m \cos \varphi} \right]. \quad (4.47)$$

Для дуги переменного тока важно знать **условия, при которых наблюдается непрерывный режим горения дуги**. С.И. Тельным определено соотношение параметров электрической цепи однофазной дуги, при которых прерывистое горение дуги переходит в непрерывное:

$$\cos \omega t'' = \cos \varphi - \frac{1}{\sin \varphi \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{e^{-\pi \cos \varphi} - 1}{e^{-\pi \cos \varphi} + 1}. \quad (4.48)$$

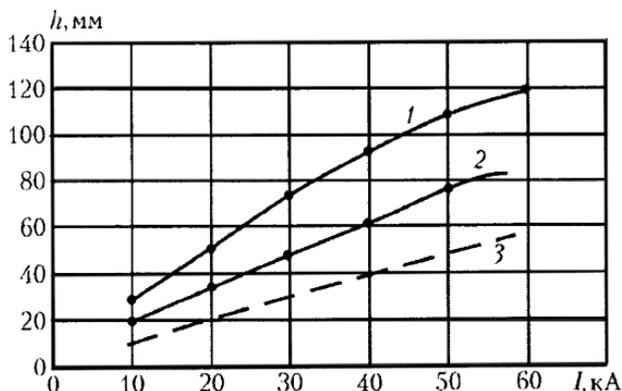
Из (4.48) следует, что для непрерывного режима горения дуги требуется обеспечить определенный угол  $\varphi$  сдвига кривой тока относительно кривой напряжения. Угол  $\varphi$  такой, чтобы в момент перехода тока через ноль к дуговому промежутку было приложено напряжение, не меньшее чем напряжение зажигания дуги. Если выбирать различные значения  $x/r = \operatorname{tg} \varphi = \gamma$ , то можно вычислить для каждого из них  $\operatorname{ctg} \omega t'$ , а затем определить  $\sin \omega t' = u_d/U_m = \beta$ . Таким образом могут быть определены граничные условия  $\gamma$  и  $\beta$ , при которых начинается непрерывное горение дуги.



**Рис. 4.25. Расчетные кривые мгновенных значений тока  $i_d$ , напряжения  $u_d$  и мощности  $u_d i_d$  малоомной дуги с последовательно включенным активным и индуктивным сопротивлениями**

В дуге, как в проводнике с током, возникают электромагнитные силы, направленные к оси дуги («пинч-эффект») в соответствии с выражением (4.37). Поскольку в газовой среде давление передается во все стороны, то в электродуговой печи давление электромагнитных сил передается от дуги на электрод и поверхность расплавленного металла. Например, при токе дуги 50 кА сила давления на металл составляет примерно 125 Н [8]. Пинч-эффект действует как на переменном, так и на постоянном токе. Под действием давления, оказываемого дугой на расплавленный металл, на его поверхности образуется мениск. Глубина мениска зависит от тока дуги, отклонения расположения столба дуги от вертика-

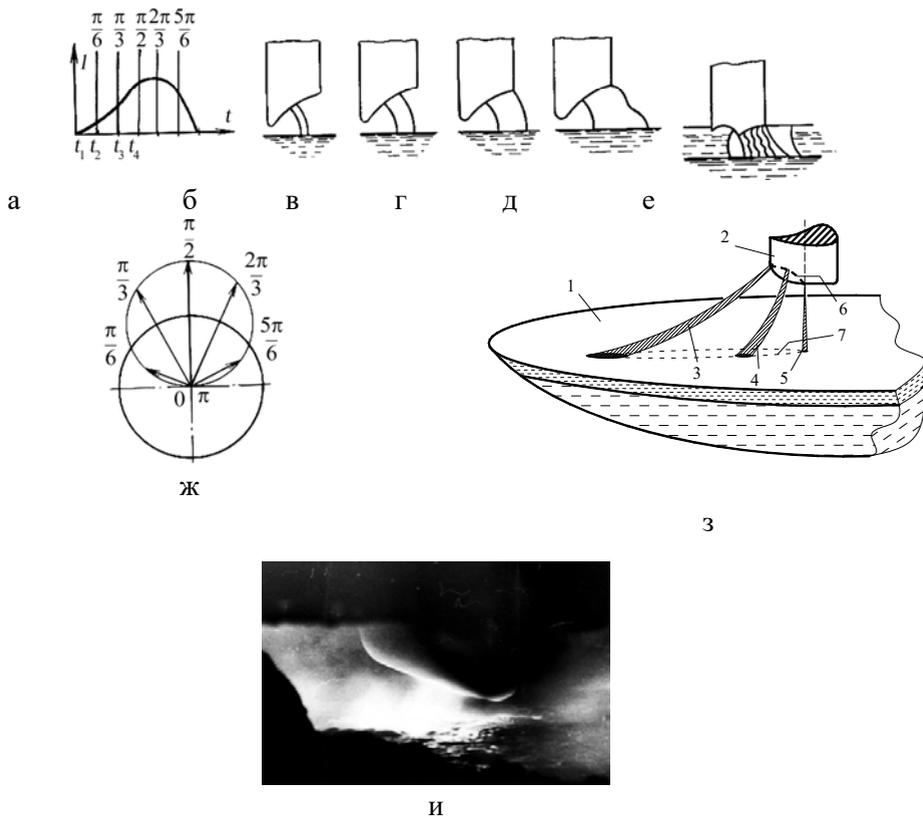
ли и поверхностного натяжения расплавленного металла. Влияние тока дуговой сталеплавильной печи на глубину мениска представлено на рис. 4.26, определенное расчетами [8] и экспериментально [9].



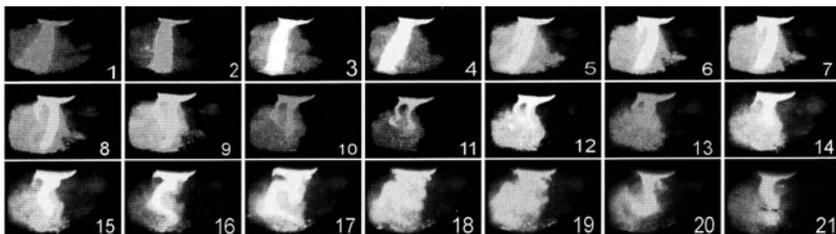
**Рис. 4.26. Влияние тока печи на глубину мениска:**  
 1 – без учета отклонения; 2 – с учетом отклонения;  
 3 – экспериментальные данные для трехфазных ДСП

В трехфазных печах в результате электродинамического взаимодействия дуг разных фаз на дуги действуют отталкивающие от центра печи силы, вызывающие соответствующий изгиб столба дуги (рис. 4.27 б, в, г, д, е). Направление сил, действующих на дугу, изменяется в течение полупериода (рис. 4.27 а) тока, как показано на рис. 4.27 ж. Траектория перемещения пятен привязки дуги на электроде и ванне жидкого металла показана на рис. 4.27 з согласно [8].

В трехфазной дуговой сталеплавильной печи (ДСП) мгновенные и действующие значения токов трех дуг изменяются случайным образом. Соответственно колеблются и электродинамические силы, действующие на дуги. Кроме того, дуги испытывают другие воздействия случайного характера (перемещения катодного и анодного пятен, изменения длины дуги и тепловых условий ее горения, конвективные потоки окружающего газа, изменение параметров токоподвода). В результате, форма дуг непрерывно изменяется случайным образом, как показано на рис. 4.28 [3]. При определенных условиях возможен режим непрерывного горения дуги. На кадрах 10 и 11 на рис. 4.28 видно, что при смене полярности электродов после перехода тока через нуль дуга загорается по еще не распавшимся ионизированным каналам, по которым она горела в конце предыдущего полупериода.



**Рис. 4.27. Фазы горения дуги – а и соответствующая ее форма б...д; расположение дуги и электрода относительно шлака и металла в восстановительный период плавки; направление силы, отклоняющей дугу от вертикали – ж:**  
 б –  $t_1 \sim \pi/6$ , в –  $t_2 \sim \pi/3$ , г –  $t_3 \sim \pi/2$ , д –  $t_4 \sim 2\pi/3$ ; при заглублении дуги в шлак – е;  
 траектория движения дуги – з: 1 – жидкая металлическая ванна, 2 – электрод, 3, 4, 5 – столб дуги в различные фазы, 6 – траектория пятна привязки на электроде, 7 – траектория пятна привязки на жидкой ванне;  
 фото дуги в одной из фаз – и



**Рис. 4.28. Видео кадры дуги в ДСП в последовательно в течение периода:**  
 кадры 1–10, когда графитовый электрод – катод,  
 кадры 11–21 – графитовый электрод – анод

Обобщённая модель электрической дуги переменного тока, учитывающие динамический режим её горения, построена с использованием нелинейных дифференциальных уравнений. Такой подход позволяет учесть важный параметр состояния дуги – тепловую инерционность дуги, путём введения **постоянной времени дуги**  $\theta_{\text{arc}}$ , мс. Помимо этого, данные модели можно существенно модифицировать, используя, например, данные случайных искажений входящих в них параметров. К таким параметрам может относиться как величина питающего напряжения  $U$ , длину дуги  $l$ , значение постоянной времени  $\theta_{\text{arc}}$ . Значение постоянной времени дуги не только колеблется в определённых пределах, но также имеет определённый характер изменения в процессе плавки. Вид **динамической вольт-амперной характеристики** (ДВАХ) сильно зависит от теплового состояния среды, в которой горит дуга, т.е. от  $\theta_{\text{arc}}$ , и также непрерывно изменяется во времени. На рисунке 4.29 приведены ДВАХ дуги в крупной промышленной печи [3].

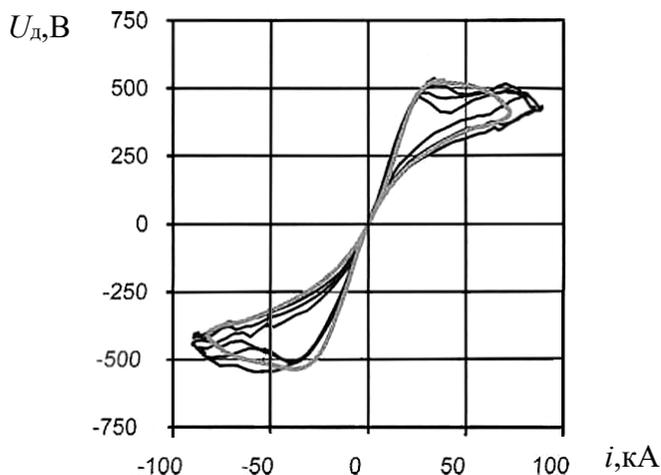


Рис. 4.29. ДВАХ дуги в промышленной печи при  $\theta_{\text{arc}} = 1,4$  мс;  $U_{\text{д}} = 393$  В

(— — — осциллограмма; — — — — — рассчитанная по модели Касси)

**Динамическая математическая модель** столба электрической дуги, строится на основе уравнения баланса мощностей:

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_0, \quad (4.49)$$

где  $Q$  – внутренняя энергия столба дуги, Дж;  $P$  – подводимая к дуге мощность от электрической цепи, Вт;  $P_0$  – отводимая мощность, т.е. мощность, отдаваемая столбом дуги в окружающее пространство теплопроводностью и излучением, Вт. Внутренняя энергия столба дуги  $Q$  представляет собой сумму всех энергий плазмы (энергии теплового движения, ионизации, колебательных и вращательных степеней свободы молекул и т. п.) и зависит от радиуса и длины дуги, т.е. от ее

объема и от температуры. Для упрощения, приэлектродные падения напряжения в первом приближении не учитываем, поскольку в промышленных дуговых печах их сумма много меньше напряжения столба дуги.

Связь между энергетическими и электрическими параметрами столба дуги показал Майр [10], который установил, что **внутренняя энергия столба дуги однозначно связана с его электрическим сопротивлением экспоненциальной зависимостью**. Это принципиальное положение открывает перспективу анализа динамических режимов дуги. При дальнейшем анализе будем исходить из существования однозначной зависимости между указанными параметрами, а экспоненциальный вид этой зависимости, на который указал Майр, вероятно, применительно к печной дуге нуждается в подтверждении или уточнении.

Из этого положения следует, что все состояния столба дуги с одной и той же внутренней энергией характеризуются одним и тем же электрическим сопротивлением. Графически, как показано на рис. 4.30, это выражается тем, что на координатной плоскости вольтамперной характеристики **вдоль прямой равносопротивления столба дуга идентична, так как обладает одной и той же внутренней энергией**. В точке  $(i_0, U(i_0))$  пересечения этой прямой со статической ВАХ дуга находится в статическом состоянии (которое может сохраняться при соответствующих внешних условиях). Значение тока  $i_0$  можно назвать **током состояния дуги** [11]. В остальных точках этой прямой столб дуги обладает той же энергией, но состояние дуги динамическое. Это означает, что энергетическое состояние столба дуги в следующий момент времени изменится, изменится сопротивление дуги и режим всей электрической цепи.

**Сопротивление столба дуги в статическом состоянии** равно

$$R_{st} = \frac{U(i_0)}{i_0}. \quad (4.50)$$

**Напряжение и на столбе дуги** в энергетически эквивалентном динамическом состоянии, можно выразить через  $R_{st}$ :

$$u = \frac{U(i_0)}{i_0} i, \quad (4.51)$$

а **подводимая к столбу дуги мощность** с учетом (4.51) равна:

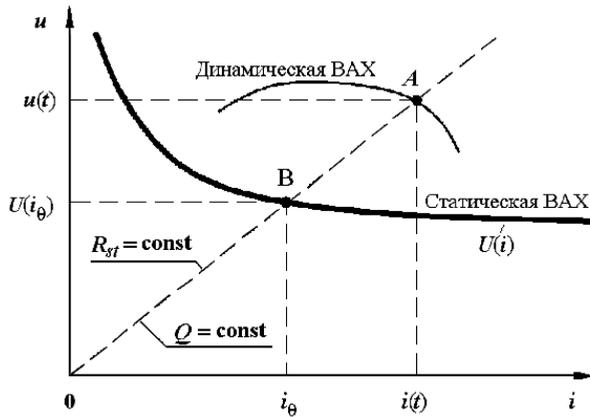
$$P = ui = \frac{U(i_0)}{i_0} i^2. \quad (4.52)$$

**В статическом состоянии, в отличие от динамического, подводимая к дуге мощность равна отводимой от нее мощности**. Поскольку все изоэнергетические состояния столба дуги идентичны (т.е. во всех этих состояниях столб дуги имеет одинаковые размеры и одинаковое распределение температуры в плазме), то **во всех изоэнергетических состояниях отводимая мощность одна и та же и определяется соответствующим статическим состоянием**.

**Отводимая мощность в статическом состоянии:**

$$P_0 = U(i_0) i_0 \quad (4.53)$$

определяется из описания энергетических параметров дуги, из которого при ряде допущений может быть построена модель дуги, например вида (4.32).



**Рис. 4.30.** Графическая интерпретация статического и динамического состояния дуги

Рассмотрим графическую интерпретацию тока состояния  $i_0$  и других параметров дуги, выполненную в [11]. На плоскости с осями координат напряжения на столбе дуги  $u$  и тока дуги  $i$  на рис. 4.30 построена кривая статической ВАХ столба дуги. Все точки, лежащие на статической ВАХ, соответствуют **статическим состояниям**, остальные точки координатной плоскости — **динамическим состояниям**. Для определенности будем рассматривать некоторую точку  $A$  с координатами  $(u, i)$ , которая лежит на динамической ВАХ. Напомним, что все идентичные изоэнергетические состояния столба дуги лежат на линии равных сопротивлений, т.е. все состояния, идентичные с состоянием для точки  $A$ , лежат на луче, исходящем из начала координат и проходящем через точку  $A$ . Этот луч пересекает кривую статической ВАХ дуги в точке  $B$ . Точка  $B$  является единственным статическим состоянием, идентичным со всеми динамическими состояниями на луче  $OA$ . Согласно определению, данному ранее, абсцисса точки  $B$  и есть ток состояния столба дуги  $i_0$ . На основании сказанного выше можно дать формулировку некоторым свойствам статической ВАХ столба дуги.

**Свойство 1. Ток состояния** находится как абсцисса точки пересечения статической ВАХ столба дуги и луча, проходящего через начало координат и заданную точку динамической ВАХ. Формулы (4.52) и (4.53) имеют четкую графическую интерпретацию, показанную на рис. 4.31. Площадь прямоугольника ***BFOE*** является отводимой  $P_0$  мощностью, а ***ADOC*** — подводимой  $P$  мощностью. Но если для состояния, определяемого различными точками на луче  $OA$ , отводи-

мая мощность одна и та же во всех случаях, то подводимые мощности – разные. Если динамическая точка лежит выше статической ВАХ, то подводимая мощность больше отводимой ( $P > P_0$ ) (рис. 4.31 а). Происходит увеличение внутренней энергии столба дуги ( $dQ/dt > 0$ ), что соответствует уменьшению сопротивления  $R_{st}$  столба дуги.

Если динамическая точка  $A'$  лежит ниже статической ВАХ, подводимая мощность будет меньше отводимой ( $P < P_0$ ) (рис. 4.31 б). Происходит уменьшение внутренней энергии ( $dQ/dt < 0$ ), что соответствует повышению сопротивления  $R_{st}$ . Таким образом, движение динамической точки  $A$  по координатной плоскости может происходить только в правую по отношению к лучу  $OA$  полуплоскость, а из точки  $A'$  – только в левую полуплоскость.

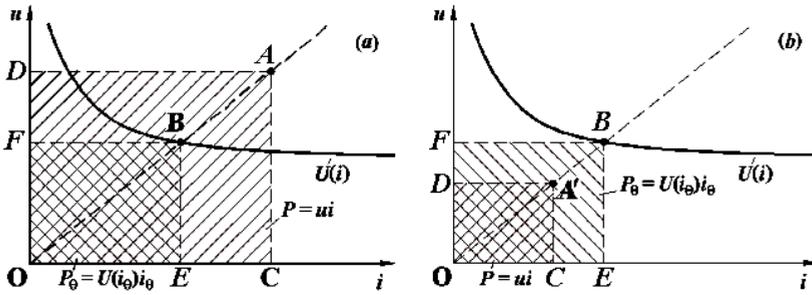


Рис. 4.31. Графическая интерпретация подводимой  $P$  и отводимой  $P_0$  мощностей

Движения по лучу также возможны, причем даже с бесконечной скоростью, так как это не требует изменения внутренней энергии столба дуги. Движение из точки  $B$  может происходить только по лучу  $OB$ . Этим же свойством обладает и начало координат (точка). Указанные особенности изменения режимов дуги иллюстрируются рис. 4.32.

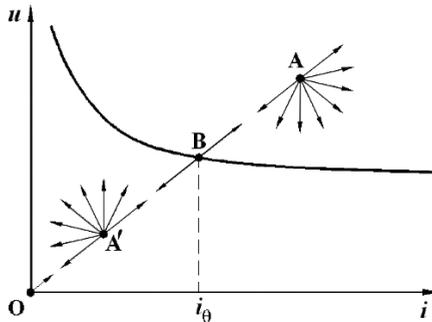


Рис. 4.32. Возможные направления движения точки динамической ВАХ в зависимости от ее расположения по отношению к статической ВАХ (сплошная кривая), если точка  $A$  лежит выше статической ВАХ,  $A'$  – ниже,  $B$  – на статической ВАХ ( $O$  – начало координат)

В случае подхода к статической точке  $B$ , на направление подхода зависит от производной  $di/dt$ , на которую влияют параметры электрической цепи.

Указанные особенности изменения режимов дуги можно сформулировать как следующее свойство.

**Свойство 2. Движение точки динамической ВАХ**, лежащей выше статической ВАХ, происходит только в правую полуплоскость от луча, проведенного из начала координат в эту точку. Движение точки динамической ВАХ, лежащей ниже статической ВАХ, – только в левую от луча полуплоскость. Движение точки, проходящей через статическую ВАХ или начало координат, – только по лучу.

Из этого свойства вытекают четыре следствия для динамических ВАХ.

**Следствие 1.** Никакая динамическая ВАХ не совпадает со статической.

**Следствие 2.** Замкнутая динамическая ВАХ не может полностью лежать выше или ниже статической ВАХ. Замкнутая динамическая ВАХ должна пересекать статическую ВАХ, по крайней мере, в двух точках.

**Следствие 3.** Точка замкнутой динамической ВАХ движется по часовой стрелке.

**Следствие 4.** Точки касания лучей, исходящих из начала координат, с динамическими ВАХ лежат на статической ВАХ.

На рисунке 4.33 показаны траектории в плоскости  $(u, i)$ , которые могут и которые не могут быть ВАХ. Эти возможности определяются с помощью свойства 2 и следствий 1–4.

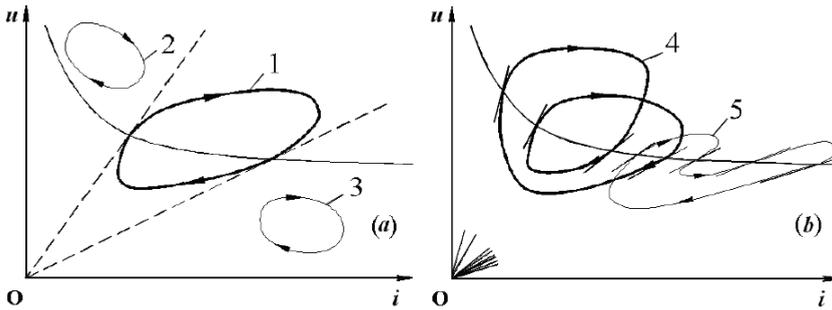


Рис. 4.33. Траектории, которые могут (1 и 4) и не могут (2, 3 и 5) быть динамическими ВАХ дуги

При движении по замкнутой траектории обязательно имеются участки уменьшения и увеличения внутренней энергии дуги, которые соответственно лежат ниже и выше статической ВАХ, что и отражают следствия 2 и 3. Следствие 4 обозначает точки экстремумов внутренней энергии и сопротивления дуги.

**Свойство 3.** Удвоенная площадь под кривой статической ВАХ равна отношению внутренней энергии столба дуги и постоянной времени дуги. Этим свойством можно пользоваться для нахождения внутренней энергии столба дуги, если известна постоянная времени дуги, или для нахождения постоянной времени по известной внутренней энергии.

Электрическая дуга как элемент электрической цепи обладает запасом внутренней энергии, содержащимся в её столбе, что позволяет сформулировать следующее свойство.

**Свойство 4.** Электрическая дуга как элемент электрической цепи является нелинейным активным (нереактивным) накопителем энергии. Это открывает возможность пользоваться многими свойствами, общими для всех накопителей энергии при анализе процессов в конкретных электрических цепях. Уточнение «нелинейный активный» в свойстве 4 определяет различие между известными реактивными накопителями энергии (реакторами и конденсаторами) и электрической дугой. Основное различие состоит в том, что столб дуги не может отдавать свою внутреннюю энергию обратно в электрическую цепь, а может лишь задерживать ее отдачу в окружающую среду.

Для построения статической вольтамперной характеристики печной дуги может быть использована полуэмпирическая статическая модель дуги постоянного тока (4.32), коэффициенты которой могут быть определены в результате статистической обработки данных по режимам ДСП, по аналогии с тем, как это было сделано для печей постоянного тока.

Для описания динамической связи характеристик дуги с параметрами электрического режима предложены различные математические модели.

Одна из наиболее *распространенных динамических моделей дуги имеет вид нелинейного дифференциального уравнения Касси* [12]:

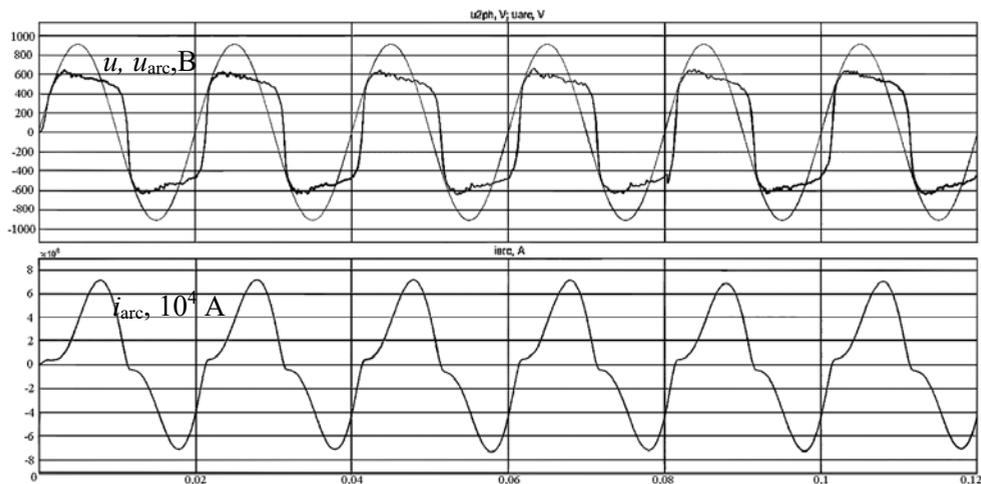
$$\theta_c = \frac{dg_{arc}(t)}{dt} = \left( \frac{u_{arc}^2(t)}{E_{arc}^2} - 1 \right) \cdot g_{arc}(t), \quad (4.54)$$

где  $\theta_c$  – *постоянная времени дуги*, с;  $g_{arc}$  – *проводимость дуги*, Ом<sup>-1</sup>;  $u_{arc}(t)$  – текущее значение напряжения дуги, В;  $E_{arc}$  – *противоЭДС дуги*, В. ПротивоЭДС дуги определяется напряжением  $U$  статической вольтамперной характеристики дуги, которое может быть рассчитано согласно выражению (4.32) в соответствии с текущими значениями тока и длины дуги, а также температуры в пространстве печи.

Модель дуги на основе нелинейного дифференциального уравнения Касси позволяет построить обобщённую трёхфазную модель электродуговой нагрузки и оценивать параметры колебаний электрического режима установки. Для этого вместо постоянных расчётных параметров следует использовать переменные, генерируемые с помощью источников случайных сигналов. Это позволяет учесть такие явления, как броски тока, провалы напряжения, погасание и зажигание электрической дуги и тому подобные явления, т.е. реалистично моделировать

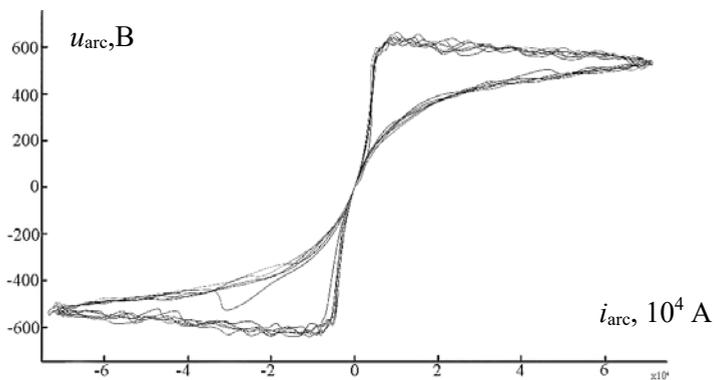
технологический процесс плавки, при котором случайно изменяются длина дуги и условия ее горения. Имеется также возможность рассматривать режим работы установки и при несинусоидальном и случайно колеблющемся напряжении источника питания.

По экспериментальным данным, снятым на ДСП-180 (классической конструкции) и ДСП-120 (системы Consteel) [12, 13], после определения параметров случайных колебаний постоянной времени дуги в процессе плавки, описанным выше методом были построены имитационные осциллограммы напряжения и тока дуги, которые представлены на рис. 4.34.



**Рис. 4.34. Моделирование изменений напряжения  $u_{arc}$  и тока  $i_{arc}$  дуги во времени при усредненном  $\theta_{arc} = 0,5$  мс с учётом случайных колебаний режима горения дуги**

На рисунке 4.35 приведена ДВАХ дуги, соответствующая случайным колебаниям напряжения и тока дуги, показанным на рис. 4.34.



**Рис. 4.35. Моделирование ДВАХ дуги при усредненном  $\theta_{arc} = 0,5$  мс с учётом случайных колебаний режима горения дуги**

#### 4.1.10. Распределение мощности в рабочем пространстве печи, передаваемой излучением дуги

Тепловое излучение дуги, как правило, играет определяющую роль в дуговых электротехнологических процессах [14] (выделение энергии в результате химических реакций далее также будет рассмотрено).

Распределение спектральной плотности излучения абсолютно черного тела в зависимости от температуры тела определяется **законом Планка**:

$$E_{0\nu} = \frac{2\pi h}{c^2} \nu^3 \left( e^{h\nu/(kT)} - 1 \right)^{-1}, \quad (4.55)$$

где  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,

$c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с – скорость распространения света в вакууме,

$E_{0\nu}$  – плотность собственного монохроматического излучения на частоте  $\nu$  абсолютно черного тела в вакууме, Вт/(м<sup>2</sup>·с).

Согласно **закону Стефана–Больцмана**, излучение  $E_0$  абсолютно черного тела в окружающее пространство, имеющие абсолютные температуры, соответственно  $T$  и  $T_0$ , пропорционально разности четвертых степеней их абсолютных температур:

$$E_0 = c_0 \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (4.56)$$

где  $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  – константа.

Для реального тела интегральная плотность потока излучения  $E$  определяется с учетом интегрального коэффициента излучения  $\varepsilon$  (степени черноты) этого тела:

$$E = \varepsilon E_0. \quad (4.57)$$

Спектр излучения газов или паров не является непрерывным, как показано на рис. 4.36. Поэтому коэффициент излучения селективно излучающих тел, таких как дуга, горящая в среде газов или паров металлов, зависит от длины волны (рис. 4.37).

В соответствии с **законом Ламберта** (законом косинусов) излучательная способность элементарной площадки  $\Delta F_1$  тела в произвольном направлении, составляющим с нормалью к этой площадке угол  $\alpha$ , прямо пропорциональна косинусу этого угла. Если поток излучения  $Q_{\Delta F_1}$  площадки  $\Delta F_1$  в окружающее пространство падает на площадку  $\Delta F_2$  под углом  $\beta$  к ее нормали, то плотность потока излучения, создаваемого площадкой  $\Delta F_1$  на площадке  $\Delta F_2$ , удаленной на расстояние  $r$  определяется выражением

$$q_{\Delta F_1 \Delta F_2} = \frac{Q_{\Delta F_1} \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\pi r^2}. \quad (4.58)$$

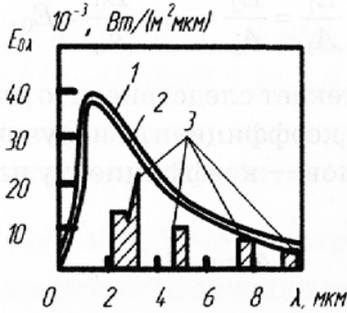


Рис. 4.36. Спектры излучения абсолютно черного (1), серого (2) и селективно излучающего (3) тел при  $T = 2000 \text{ K}$

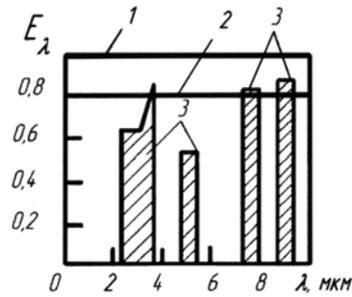


Рис. 4.37. Зависимость коэффициента излучения абсолютно черного (1), серого (2) и селективно излучающего (3) тел от длины волны  $\lambda = 1/\nu$

В дуговой печи излучение дуги, падающее на футеровку, и материалы, находящиеся в печи, частично экранируется собственным и соседними электродами, шлаком и мениском, образующимся в жидком металле под опорным пятном дуги, как показано на рис. 4.38.

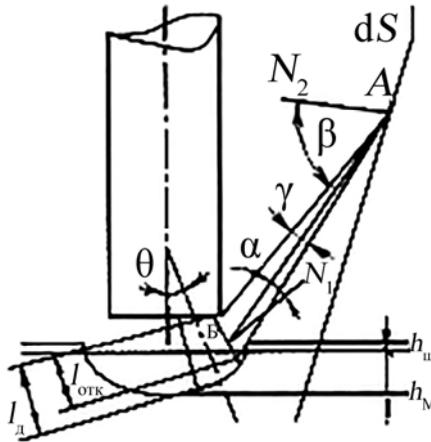


Рис. 4.38. Экранирование дуги электродом, шлаком и металлом

При расчете лучистого теплообмена в дуговой печи необходимо учитывать кроме перечисленных и другие постоянно меняющиеся факторы: длину дуги и ее пространственное расположение, температуру и расположение шихтовых материалов, футеровки, водоохлаждаемых элементов и проемов, поглощение излучения дымовыми газами. Для корректного учета указанных факторов при расчетах пользуются инженерными методиками и численными методами, которые рассмотрены в технической литературе [15, 16].

#### 4.1.11. Распределение мощности в жидкой фазе рабочего пространства дуговых печей

Пространственное распределение мощности определяет протекание основных процессов в ванне дуговой печи, в том числе в той ее части, которая заполнена жидкими продуктами. В свою очередь, распределение мощности в жидкой фазе рабочего пространства печи определяется граничными условиями, которые зависят от геометрии рабочего пространства, электропроводности находящихся там материалов и футеровки ванны, схемы подвода электрической мощности к электродам и к печной ванне.

Наиболее распространены трехэлектродные печи переменного трехфазного тока. Редко встречаются двухэлектродные печи переменного однофазного тока, в которых рабочее напряжение прикладывается к электродам. В трехэлектродных и двухэлектродных печах металлическая ванна не имеет гальванической связи с печными трансформаторами. Рабочий ток замыкается между электродами. Это позволяет скомпенсировать значительную часть магнитного поля токоподвода к электродам путем выполнения бифилярных проводников короткой сети. Схема с проводящей подошмой (подовым электродом), подключенной к трансформаторам, в печах переменного тока не используется из-за того, что такая схема приводит к высокой индуктивности печного контура, резкому снижению коэффициента мощности и неэффективному использованию установленной мощности трансформаторов, соответственно, низкой производительности и высокому расходу электроэнергии.

При использовании постоянного тока схема с одним сводовым и подовым электродом предпочтительна. Высокая индуктивность печного контура при этом становится полезной, так как повышает устойчивость горения дуги, а отрицательное влияние индуктивности на коэффициент мощности отсутствует. Кроме того, как показано ниже, подача рабочего напряжения между сводовым электродом и подошмой позволяет повысить энергетические и технологические характеристики печи благодаря более эффективному распределению мощности в рабочем пространстве печи.

Характер распределения мощности в кусочно-однородном представлении среды применительно к руднотермической печи исследовался с помощью специально разработанной математической модели [17], путем решения уравнения Лапласа для электрического потенциала поля  $u$ :

$$\nabla^2 u = 0, \quad (4.59)$$

с учетом условий сопряжения на поверхностях раздела сред ( $k$ ,  $m$ ) с различной электропроводностью  $\gamma$  :

$$u_k = u_m, \\ \gamma_k \partial u_k / \partial n = \gamma_m \partial u_m / \partial n. \quad (4.60)$$

Решение уравнения (4.59) при условиях (4.60) позволило получить зависимость потенциала электрического поля от координат и рассчитать напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$ , плотность тока  $\delta$ , удельную объемную мощность  $P_V$ , и мощность  $P$ , выделяющуюся в технологической зоне рабочего пространства объемом  $V$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\text{grad}U; \\ \delta &= \gamma \mathbf{E}; \\ P_V &= \gamma \mathbf{E}^2; \\ P &= \int_V P_V \, dv, \end{aligned} \tag{4.61}$$

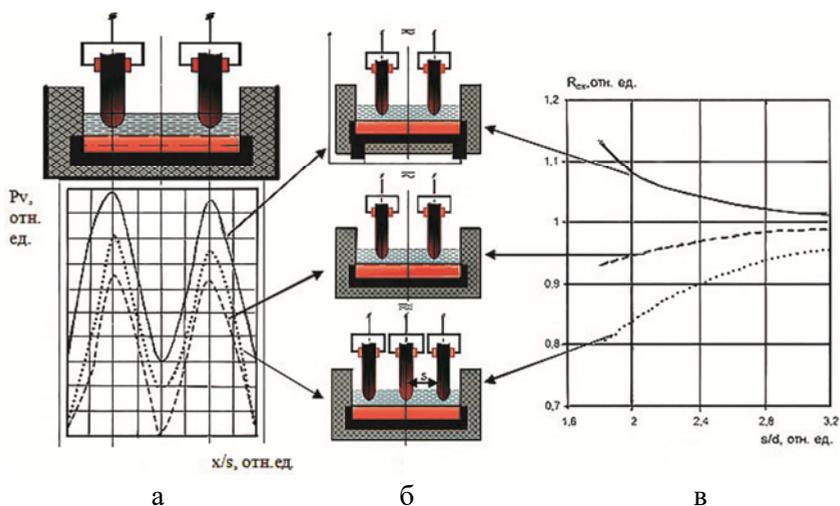
а также электрическое сопротивление печной ванны  $R_{\text{сх}}$ , как обобщенной характеристики схем подключения печи к источнику питания, показанных на рис. 4.39 б.

На рисунке 4.39 а показано распределение удельной объемной мощности  $P_V$  на поверхности шлаковой ванны, контактирующей с ванной жидкого металла, для трех схем подключения печи: схемы электрод-подина (верхняя), *схемы питания электроды–электрод* (средняя) и трехфазной *трехэлектродной схемы* (нижняя) [18]. На рисунке 4.39 в, для тех же схем показана зависимость электрического сопротивления печной ванны  $R_{\text{сх}}$  от межэлектродного расстояния, отнесенного к диаметру электродов  $s/d$ .

Анализ результатов моделирования распределения мощности в ванне РТП показывает, что наилучшими характеристиками обладает *схема «электрод-подина»*, обеспечивающая:

- наибольшую концентрацию мощности под электродами;
- наибольшую эффективность для энергоемких процессов РВП;
- более высокую равномерность распределения мощности на поверхности шлак-металл, что важно для многошлаковых процессов;
- наибольшее сопротивление ванны печи, что обеспечивает улучшение энергетических показателей печей;
- рост электрического сопротивления при сближении электродов ванны (в то время как при других схемах оно снижается);
- позволяет уменьшить размеры ванны печи (сократив ее весогабариты) и соответственно повысить концентрацию мощности, снизить удельный расход электроэнергии;
- создает условия для применения более чистых восстановителей и повышения качества конечных продуктов.

Повышение сопротивления ванны с проводящей подиной объясняется включением токов, замыкающихся непосредственно между электродами (в традиционных печах, называемых *токами «треугольника»*), что благоприятно сказывается на всех параметрах печи и технологического процесса.



**Рис. 4.39. Распределение удельной объемной мощности – а; при различных схемах подключения печи – б; электрическое сопротивление ванны в функции от расстояния между электродами  $s$ , отнесенного к диаметру электрода  $d$  – в; (размерность относительные единицы)**

#### **4.1.12. Электромагнитное перемешивание жидкого металла в дуговых печах постоянного тока**

Задачей любого плавильного процесса является получение расплава заданного химического состава и определенной температуры. При получении металлов и сплавов крайне важно обеспечить перемешивание формируемой жидкой ванны, так как это позволяет ускорить расплавление загрузки, повысить скорость и полноту необходимых металлургических реакций, получить однородный по температуре и химическому составу расплав.

Одним из наиболее эффективных способов перемешивания жидкого металла является электромагнитное перемешивание жидкой ванны на постоянном токе, получившее в литературе название *электровихревого течения* (ЭВТ).

Для возбуждения силы Лоренца, по аналогии с принципом действия электродвигателя постоянного тока, необходимо в жидком металле создать скрещивающиеся поля – магнитное и электрическое. В дуговых печах постоянного тока (ДППТ), как показано в предыдущем разделе, электрический ток проходит через всю глубину ванны между сводовым и подовым электродом. Если в подине выполнить не один, а два и более подовых электродов, магнитное поле, создаваемое током, протекающим к одному подовому электроду, будет пересекать линии тока, протекающего в жидком металле к другому подовому электроду. В результате взаимодействия пересекающихся полей возникает сила Лоренца, которая вызывает движение жидкого металла. Ниже рассмотрены основные закономерности данного явления.

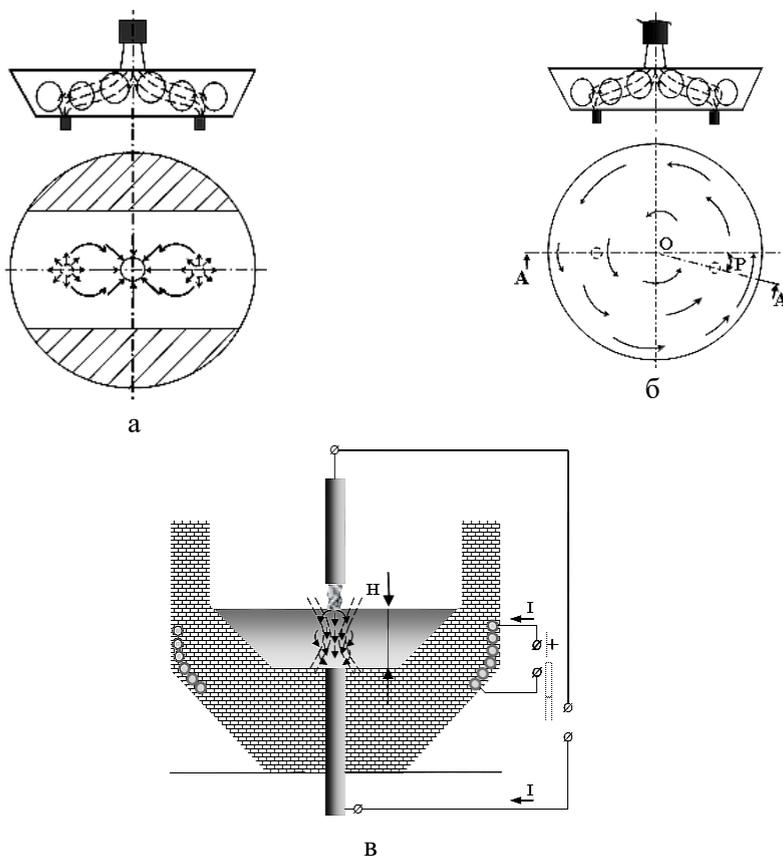
Общая картина движения металла в ДППТ изучалась путём математического моделирования структуры крупных вихрей и определения локальных осредненных характеристик турбулентности с использованием известной модели крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES), а также с помощью так называемой  $k-\varepsilon$  модели турбулентности [19]. Как показало численное моделирование, естественная конвекция не вносит существенного вклада в процесс перемешивания металла в дуговой сталеплавильной печи. Полученные на модели результаты сравнивались с данными визуальных наблюдений за движением металла на поверхности расплава на печах постоянного тока: вместимостью 12, 15 и 25 т. Учитывались также данные, полученные с помощью физического моделирования на ртутных моделях [20,21].

Результаты моделирования при разнообразных сочетаниях конструктивных параметров и электрических режимов ДППТ позволяют выделить три характерные картины движения расплава в ванне печи.

1. В первом случае, показанном на рис. 4.40 а подовые электроды расположены на одинаковом расстоянии от центра ванны, оси сводового и подовых электродов находятся в одной плоскости, токи в подовых электродах  $I_1$  и  $I_2$  равны и в сумме составляют общий ток дуги  $I$ . Пространственное растекание тока в ванне и, как следствие, распределение электромагнитных сил в меридиональной плоскости, проходящей через дугу и подовые электроды, является симметричным. В этом случае жидкий металл в верхних слоях ванны и на её поверхности со всех сторон движется в район анодного пятна дуги, где формируется центральная струя диаметром  $d_n$ , в которой металл движется вниз с вертикальной скоростью  $V_z$ . Вблизи дна ванны струя разделяется на два потока, направленных к подовым электродам. Над подовыми электродами формируются вихреобразные струи, направленные вверх к поверхности ванны, в результате чего в объёме ванны возникает замкнутая циркуляция жидкого металла. Вместе с тем, как показано на рис. 4.40 а, в ванне сохраняются значительные застойные области (заштрихованы), где скорость движения жидкого металла минимальна.

2. При физическом моделировании процесса электромагнитного перемешивания жидкого металла (ЭМПЖМ), как показано в работе [20], было обнаружено, что устранить застойные зоны в ванне жидкого металла можно в тех случаях, когда токи в подовых электродах различны, а подовые электроды установлены несимметрично относительно центра ванны печи. В этих случаях пространственное растекание тока и распределение электромагнитной силы не являются симметричными, что в свою очередь приводит к возникновению в объёме ванны азимутального (вращательного) момента электромагнитных сил относительно оси ванны. В результате вдобавок к описанной выше картине вертикальной циркуляции со скоростью  $V_z$ , жидкий металл начинает вращаться вокруг оси ванны с азимутальной скоростью  $V_\phi$ . Картина совместного вертикального и азимутального движения металла, при которой в объёме ванны отсутствуют застойные области, для этого случая схематически представлена на рис. 4.40 б.

3. Для печей с одним подовым электродом, когда развитую вертикальную циркуляцию жидкого металла по различным причинам организовать затруднительно, ЭМПЖМ можно создать путём установки внутри или снаружи кожуха печи специального соленоида, питаемого постоянным током от того же или независимого дополнительного источника. На рисунке 4.40 в, схематически показано питание от независимого источника, что позволяет отдельно управлять дуговым режимом и процессом перемешивания металла. При взаимодействии в ванне печи вертикальной составляющей магнитного поля соленоида с радиальной составляющей тока основного источника, питающего дугу, в ванне возникает азимутальное движение жидкого металла, скорость которого  $V_{\phi}$  можно регулировать, изменяя величину тока соленоида.



**Рис. 4.40. Картина движения жидкого металла в ванне ДПТ:**  
 а – при симметричной установке и загрузке током подовых электродов;  
 б – при несимметричной установке и загрузке током подовых электродов;  
 в – при установке соленоида и одном подовом электроде

В работе [19] методом математического моделирования процесса ЭМПЖМ было показано, что сформулированные таким образом условия для эффективного перемешивания жидкого металла выполняются, если в ванне с жидким металлом отсутствуют застойные области, где скорости движения металла минимальны, и при вертикальной циркуляции металла со скоростью  $V_z$  через поперечное сечение центральной струи диаметром  $d_{п}$  за время  $\tau = 5$  минут (300 с) пройдет двукратный объем  $Q_m$  жидкого металла в ванне печи.

Математическое моделирование не только позволило рассчитать поле скоростей и определить режимы эффективного электромагнитного перемешивания в дуговой печи с двумя подовыми электродами (рис. 4.41 а и б), но и построить динамическую картину выравнивания химического состава в ванне печи. На рисунке 4.41, в показано распределение концентрации материала добавки, вносимой в ванну (указано стрелкой) для легирования металла. Справа на рисунке показана шкала концентрации внесенной примеси.

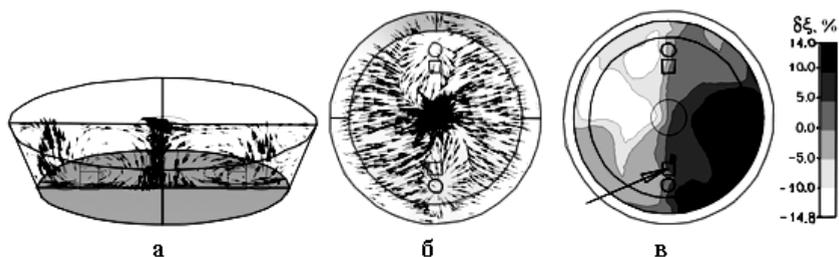


Рис. 4.41. Вектора скорости (а, б) и распределение неоднородности концентрации примеси в ванне дуговой печи постоянного тока

На рисунке 4.42 показано поле векторов скоростей движения жидкого металла в вертикальном сечении ванны при несимметричном токовом режиме двух подовых электродов (квадратами обозначены зоны расположения подовых электродов). В таком режиме эффективность ЭМПЖМ дополнительно возрастает.



Рис. 4.42. Вектора скорости при несимметричном распределении токов двух подовых электродов

Результаты моделирования ЭМПЖМ были проверены на действующих печах постоянного тока вместимостью 12 и 15 т. На печи вместимостью 15 т при равенстве токов в подовых электродах наблюдается направленное движение ме-

талла на поверхности с малой скоростью  $0,07 \div 0,10$  м/с. При необходимости интенсивно перемешать жидкую ванну (например, после присадки значительного количества шлакообразующих или легирующих добавок), в соответствии с результатами моделирования, в одном из подовых электродов устанавливался номинальный ток  $I_1 = 18$  кА, а во втором подовом электроде – равный половине от номинального тока  $I_2 = 9$  кА при общем токе дуги в печи

$$I = I_1 + I_2 = 0,75 I_{\text{ном}} = 27 \text{ кА,}$$

где  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток источника электропитания печи.

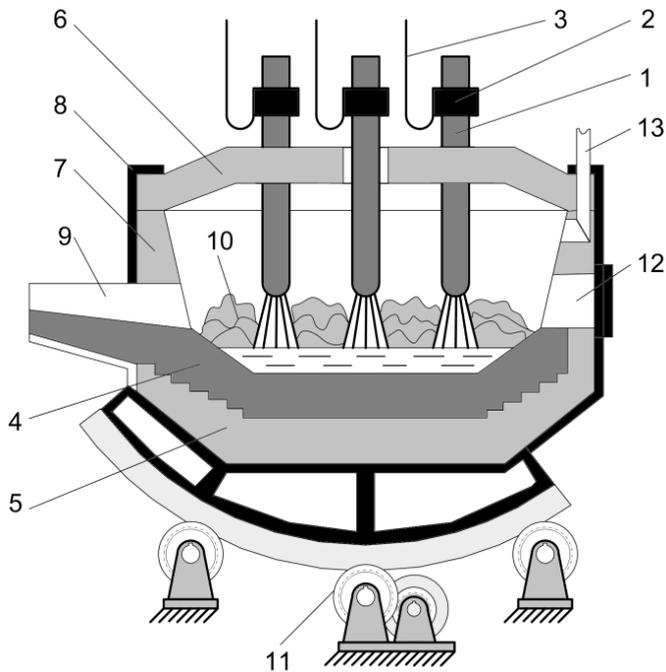
Скорость движения жидкого металла на расстоянии  $2/3$  радиуса ванны от центра согласно указанным выше измерениям, составляла  $V_{\phi} = 0,5$  м/с. При этом обеспечивалось эффективное перемешивание жидкого металла с выравниванием поля температур и концентраций вводимых в металл присадок максимум за  $4 \div 5$  мин. Следует подчеркнуть, что организованный описанным способом процесс электромагнитного перемешивания жидкого металла хорошо управляем: требуемые скорости движения металла с вращением ванны возникают при указанном разбалансе токов в подовых электродах, а при равенстве токов вращение прекращается, и скорость металла резко снижается. Это позволяет сталевару, не меняя теплового режима печи по своему усмотрению регулировать скорость движения металла в широких пределах. Для интенсификации процесса перемешивания на печах постоянного тока предусмотрен автоматический режим периодического переключения соотношения тока в каждом из подовых электродов на обратную величину с сохранением постоянного значения общего тока в ванне  $I$ . При этом направление азимутального вращения металла в ванне изменяется на противоположное первоначальному направлению.

## **4.2. Дуговые сталеплавильные печи (ДСП)**

### **4.2.1. Основные элементы конструкции ДСП**

Дуговые сталеплавильные печи являются самыми распространенными и энергоемкими дуговыми установками, применяемыми в металлургии. Обычно дуговые печи используются для выплавки стали из металлического лома (скрапа). Также строятся печи для работы с металлизированным сырьем – губчатым железом в виде гранул или брикетов, которые получают из руды путем восстановления оксидов. Номинальная вместимость выпускаемых печей варьируется, преимущественно, в диапазоне от 10 до 200 т, а мощность от 5 до 160 МВА. Максимальную вместимость 420 т при мощности источника питания 180 МВА на сегодняшний день имеет дуговая печь постоянного тока производства фирмы Danieli, Италия, работающая в Японии на заводе *Tokyo Steel*.

На рисунке 4.43 приведена схема трехфазной дуговой печи. Печь имеет три графитированных цилиндрических электродов (1), закреплённых в электрододержателях (2). К электродам с помощью вторичного токоподвода (3) подводится трехфазный электрический ток. Вторичным токоподводом называют часть цепи питания печи между выводами вторичной обмотки печного трансформатора и электродами, а короткой сетью – весь участок цепи между вторичной обмоткой трансформатора и дугами. Плавильное пространство печи ограничено подиной (4, 5) сводом (6) и стенками (7). Корпус печи имеет форму цилиндра. Снаружи он заключён в прочный стальной кожух (8), внутри футерован основным или кислым кирпичом (5). Свод (6), в котором имеются отверстия для электродов, обычно выполняется с возможностью его подъема и отворота для загрузки шихты (10). Электрическая дуга зажигается между электродами и металлической шихтой (10), после чего металл расплавляется.



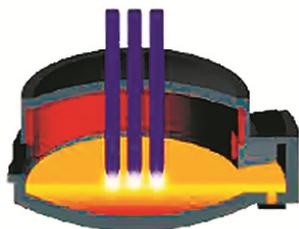
**Рис. 4.43. Схема дуговой сталеплавильной печи:**

- 1 – электроды; 2 – электрододержатели; 3 – токоподводы;
- 4 – подина; 5 – днище; 6 – свод; 7 – огнеупорная стенка;
- 8 – стальной кожух; 9 – сливной носок (лётка); 10 – шихта;
- 11 – механизм наклона; 12 – рабочее (загрузочное) окно;
- 13 – устройство для выпуска газов

Геометрия рабочего пространства и конструкция футеровки определяются назначением печи и условиями протекания технологического процесса. Для печей классической конструкции, преимущественно применяемой в настоящее время, при выплавке стали полным циклом в литейных производствах, расчет геометрических размеров печной ванны и футеровки могут быть выполнены по методике [22]. При определении основных геометрических размеров средних и крупных металлургических ДСП можно ориентироваться на отработанные практикой параметры печей, согласно табл. 4.3.

Сначала в загруженной шихте под электродами проплавляются так называемые колодцы, в которые по мере проплавления шихты погружаются электроды. После нагрева примерно до  $800^{\circ}\text{C}$  шихта теряет механическую прочность, оседает и, затем, расплавляется. В стенке корпуса печи выполняют рабочее окно 12, необходимое для скачивания шлака, загрузки шлакообразующих и легирующих компонентов, взятия проб, замеров температуры жидкого металла. Готовую сталь выпускают через сливное отверстие и сливной носок 9 (в крупных современных печах сливное отверстие, открываемое для выпуска с помощью шибера затвора, расположено в донной части так называемого «эркера»). Печь опирается на секторы и имеет привод 11 для наклона в сторону рабочего окна или выпускного отверстия. Загрузка печи осуществляется при сдвинутом (путем подъема и отворота) своде.

Схема рабочего пространства и внешний вид современной дуговой сталеплавильной печи вместимостью 180 т показаны на рис. 4.44. В этой печи выполнены токоведущие рукава электрододержателей. Несущая стальная часть рукавов электрододержателей покрыта (плакирована) медью. Для выравнивания взаимной индуктивности между фазами (с целью снижения переноса мощности между фазами) рукава триангулированы, т.е. их продольные оси расположены по вершинам равнобедренного треугольника.



а



б

**Рис. 4.44. Схема рабочего пространства (а) и внешний вид дуговой сталеплавильной печи вместимостью 180 т производства фирмы VAI FUCHS (ММК, Магнитогорск, РФ)**

#### 4.2.2. Выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах

Сталь различных марок является наиболее распространенным конструкционным материалом. Сталь представляет собой сплав железа с углеродом с содержанием последнего от 0,1 до 2,14%. Для качества стали критичны такие вредные примеси, как сера и фосфор: их наличие, даже в малой (доли процента) концентрации, резко ухудшает механические свойства стали. В состав стали могут входить легирующие добавки (содержанием от долей процента до десятков процентов), призванные придать стали особые свойства – жаростойкость (с этой целью в сталь добавляются хром, алюминий, титан), жаропрочность (хром, никель), высокое удельное электрическое сопротивление, важное для электротехнических сталей (кремний), и т.д. Стали с наличием таких добавок называются легированными сталями.

Наибольшая часть стали в мире производится *кислородно-конвертерным способом* из жидкого чугуна. Чугун, полученный в доменной печи, заливают в крупный грушеобразный футерованный сосуд (конвертор) емкостью до 60 т и более и подвергают продувке кислородом, что приводит к активному окислению (сгоранию) таких примесей, как сера и фосфор, а также «лишнего» углерода (напомним, что для того, чтобы превратить чугун в сталь, необходимо уменьшить содержание углерода в его сплаве с железом с 2,14–6% до 0,1–2,14%). При загрузке конвертора к жидкому чугуну можно добавить определенную долю (до 20–25% по массе) стального лома. Реакции окисления экзотермические и при наличии кислородного дутья протекают с выделением большого количества теплоты, которого достаточно не только для поддержания расплава чугуна в жидком состоянии, но и для расплавления стального лома, и для перегрева расплава до температуры порядка 1600°C, оптимальной для выгорания углерода. Таким образом, конвертор не требует обогрева ни пламенем, ни электричеством.

Очевидными преимуществами кислородно-конвертерного способа являются малая энергоемкость процесса (отсутствует обогрев конвертора) и высокая производительность (процесс выплавки стали в кислородном конверторе занимает не более 30 мин). Однако таким способом можно получать лишь массовые стали не самого высокого качества (углеродистые, нелегированные). Кислородно-конвертерный процесс протекает лавинообразно и практически неуправляем. В отличие от этого, при выплавке стали в ДСП возможно активно управлять процессом, как путем дозирования энергии (регулирования электрического режима), так и введением в сталь различных добавок (легирующих, раскислителей и других). Кроме того, в ходе плавки периодически проводятся экспресс-анализы химического состава стали, и по их результатам вносятся коррективы в режим плавки или вводятся добавки. Легирование стали в кислородном конвертере крайне затруднено, поскольку при интенсивном кислородном дутье легирующие добавки сгорают. Недостатками кислородно-конвертерного способа также явля-

ются значительный (до 10%) угар стали, т.е. потери за счет окисления железа, и плохая приспособленность к переработке стального лома (доля стального лома в загрузке конвертора не превышает 20–25%).

Перерабатывать большое количество стального лома позволило внедрение в промышленность в конце XIX в. мартеновских печей, названных по имени французского изобретателя П. Мартена (1824–1915). Мартеновская печь представляет собой установку пламенного нагрева с регенерацией тепла продуктов сгорания, в качестве топлива использует природный газ или мазут. По сравнению с мартеновской печью, дуговая сталеплавильная печь, позволяет получать сталь гораздо более высокого качества за счет уменьшения угара, отсутствия загрязнения металла продуктами сгорания, более гибкого управления мощностью, низкими тепловыми потерями и значительным уменьшением выбросов вредных веществ в окружающую среду. По указанным причинам от использования мартеновских печей в большинстве стран отказались.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) сегодня являются основными технологическими установками для переработки стального лома и выплавки качественных сталей. В ДСП получают, в том числе, ответственные сорта сталей, требующие тщательной очистки, или высоколегированные, такие, как шарикоподшипниковые, электротехнические, инструментальные, нержавеющие стали.

Интересно отметить, что в Российской Федерации в 2015 г. произведено 71,1 млн т стали. По этому показателю наша страна занимает пятое место в мире, уступая КНР (803,8 млн т – около 50% мирового производства!), Японии (105,2 млн т), Индии (89,6 млн т) и США (78,9 млн т). В 2017 г. доля электростали, выплавленной в России, составила 31% от общего производства стали. В мировом производстве доля электростали растёт от года к году. Так с 2016 по 2017 гг. доля стали, выплавленной во всем мире в электропечах, возросла с 26 до 28%.

Печи малой вместимости до 25 т, работающие в литейных производствах, имеют относительно небольшую удельную мощность – до 0,6...0,7 МВА/т и работают полным металлургическим циклом (двухшлаковый процесс плавки) с использованием основной футеровки ванны, изготовленной из магнезитового (MgO) кирпича. Как правило, в таких печах стены и свод выполнены из огнеупорного кирпича.

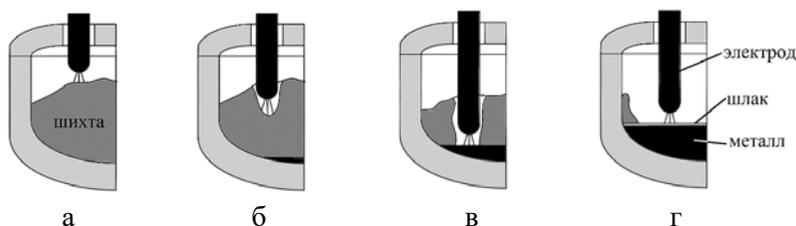
Для загрузки металлошихты в печь свод печи приподнимается и отворачивается с помощью механизма подъема и отворота свода. Загрузочную корзину, предварительно заполненную металлоломом с добавлением порции извести и карбюризатора (коксыка, электродного боя, чугуна), мостовым краном заносят над раскрытой ванной печи. Дно загрузочной корзины (ее называют также загрузочной бадьей) раскрывается, и шихта падает в печь. Свод возвращается в рабочее положение. После подачи на электроды напряжения, они опускаются до контакта с шихтой. Под электродами зажигаются дуги (рис. 4.45 а) и начинается плавка.

В период расплавления печь работает на максимальной мощности, чтобы расплавить шихту максимально быстро, так как от времени расплавления шихты зависят и производительность печи, и ее КПД. На рисунке 4.45 показаны этапы расплавления шихты. Когда образуется жидкая ванна, начинают ее продувку кислородом (по устаревшей технологии, когда отсутствовала возможность подачи газообразного кислорода, его вводили, подавая в ванну железную руду или металлизированные железные окатыши). Одновременно подают в печь известь CaO и наводят в ванне шлак основной шлак. Углерод, содержащийся в металле, вступает в реакцию с кислородом с образованием угарного газа CO, пузырьки которого, поднимаясь, уносят из металла неметаллические включения и газы. Выделение пузырьков CO, по аналогии с кипением жидкости, получило название «кип» (на самом деле температура стали и шлака при этом значительно ниже точки кипения). Кислород окисляет также железо до FeO, и фосфор до P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, которые переходят в шлак. Окисляются и удаляются в шлак некоторые металлические примеси (марганец, кремний). Кислород и фосфор являются поверхностно активными элементами, поэтому реакция окисления фосфора получает развитие не в глубине ванны, а на поверхности раздела металл-шлак:



Для проведения эффективной дефосфорации необходимо обеспечить в печи достаточное количество железистого (окисленного) высокоосновного шлака. После окончания процесса дефосфорации в литейных производствах окисленный шлак полностью скачивают (во избежание последующего восстановления фосфора), наклоня печь в сторону рабочего окна на угол до 15°. На время скачивания шлака печь отключают от сети, электроды поднимают во избежание поломки.

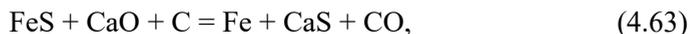
Далее, в печах литейного класса наводят свежий высокоосновный шлак для проведения восстановительного периода (рафинирования) и доводки стали по химическому составу. Такой процесс выплавки стали называют двухшлаковым. Задачами восстановительного периода в печи с основной футеровкой являются: а) раскисление металла, б) удаление серы, в) доведение химического состава стали до заданного, г) регулирование температуры ванны с целью создания благоприятных условий для раскисления металла и удаления серы, удаления газов и неметаллических включений и для обеспечения качественной разливки стали. Практически все указанные задачи решаются параллельно.



**Рис. 4.45. Основные этапы плавления шихты в ДСП:**

а – начало плавления; б – опускание электрода, образование колодца;  
в – начало подъема электрода; г – окончание плавления

В начале рафинирования в сталь добавляют раскислители – ферросилиций, ферромарганец и другие. Удаление серы происходит за счет диффузии сернистого железа в известковый шлак, где сера связывается известью. Реакция связывания серы шлаком эндотермическая, т.е. протекает с поглощением теплоты, поэтому необходимо, чтобы металл был перегрет. Напомним, что в состав шлака, помимо извести, входит углеродный восстановитель – молотый кокс. В шлаке одновременно происходят реакции связывания серы известью по суммарному уравнению:



являющиеся необратимыми, поскольку CO в виде газа улетучивается из шлака.

В конце рафинирования в сталь вводят необходимые легирующие добавки. Нужно отметить, что большинство легирующих добавок вводят в сталь не в чистом виде, а в виде ферросплавов – сплавов с железом (феррохром, ферромарганец, ферроникель, ферросилиций и др.), предварительно полученных в рудно-термических (рудовосстановительных) печах. При подготовке к выпуску из печи доводят температуру металла до заданной. Перед выпуском металла или во время выпуска выполняют финишное раскисление (например, алюминием). Выпуск производят в сталеразливочный ковш, наклоня печь на угол до  $45^\circ$  в сторону выпускного отверстия. После выпуска печь устанавливают в горизонтальное положение и производят горячий ремонт футеровки, забрасывая на откосы и подину ремонтный порошок на основе магнезита, который, оплавляясь, приваривается к раскаленной футеровке. Далее цикл плавки повторяется.

График изменения электрического режима в течение двухшлакового процесса плавки представлен на рис. 4–46. Указанная на нем длительность технологических операций относится к печам с низкой удельной мощностью. Внедрение более энерговооруженных дуговых печей, использование современных конструктивных и технологических решений позволяет значительно сократить длительность всех стадий плавки, что благоприятно сказывается на всех технико-экономических показателях.

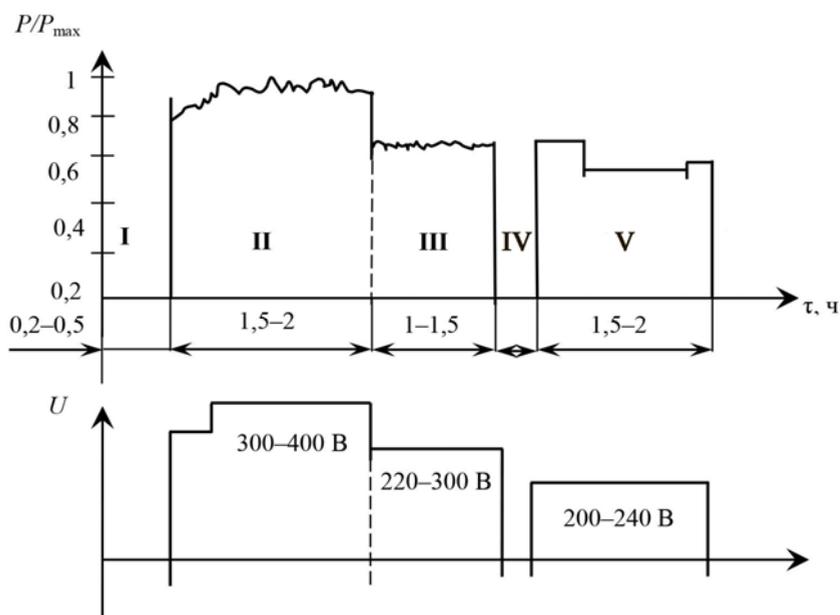
Для сокращения длительности расплавления стремятся в этот период работать на максимальной возможной мощности. Электроды быстро проплавляют в шихте колодцы (рис. 4.45 б, в) и заглубляются в них. При этом пятна привязки дуги постоянно перескакивают с одних кусков шихты на другие, резко меняются длина дуги и тепловые условия ее горения. Кроме того, часто происходят обвалы шихты, приводящие к металлическим коротким замыканиям и обрывам дуги. Дуга в колодце, окруженная холодной шихтой, очень коротка (20–30 мм) и неустойчива. Технологические короткие замыкания – обычное явление в ДСП, в период расплавления шихты они возникают до 5–10 раз в минуту. Из-за этого начальная стадия расплавления характеризуется крайне неравномерным электрическим режи-

мом, что снижает среднюю активную мощность, вводимую в печь, и отрицательно влияет на качество питающего напряжения. Режим горения дуг становится спокойней после расплавления большей части шихты (рис. 4.45 г), но при этом может возникнуть необходимость снижения мощности для снижения тепловой нагрузки на открывшиеся для излучения дуг участки футеровки свода и стен печи. Период расплавления считается законченным, когда вся шихта перейдет в жидкое состояние. К этому моменту поверхность металла покрыта слоем шлака (шлак легче металла), режим горения дуги становится более спокойным, дуга горит устойчивее. Из-за повышения температуры в печи проводимость дугового промежутка улучшается, градиент напряжения дуги падает, длина ее увеличивается в несколько раз, частота бросков тока и обрывов дуги значительно снижается.

Из вышесказанного ясно, что в период расплавления шихты мощность, потребляемая печью, и токи изменяются часто, резко и в значительном диапазоне. Для ограничения бросков тока при технологических коротких замыканиях и повышения устойчивости дуги в малых ДСП последовательно с питающим трансформатором включают на стороне высокого напряжения дополнительную индуктивность – реактор. В крупных печах (емкостью 20 т и выше) индуктивность короткой сети (трансформатор, токоподводы) весьма велика ( $\cos\varphi$  таких печей не превышает 0,7), поэтому необходимость использовать реактор в таких печах требует обоснования.

В окислительный период, как видно из рис. 4.46, электрическую мощность снижают, так как в ванне в результате протекания экзотермических реакций окисления выделяется значительная тепловая мощность. При бурном газовыделении – «вскипании» ванны, печь отключают во избежание разлива шлака. Как было показано в разделе 4.1.4 при повышении температуры в печи градиент напряжения в столбе дуги снижается. При неизменном напряжении это приводит к увеличению длины дуги, что приводит к уменьшению колебаний электрического режима. На стадии рафинирования длина дуги составляет 200–300 мм, режим наиболее спокойный, мощность после перегрева стали в начале стадии снижается до уровня 40–60% максимальной. В самом конце плавки возможно некоторое увеличение мощности, чтобы перегреть сталь перед разливкой для улучшения текучести.

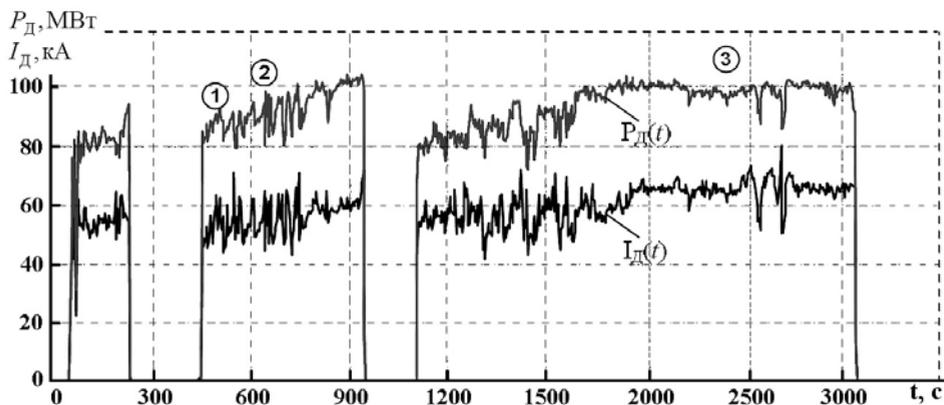
С целью переплава стали для фасонного литья на предприятиях автомобильной и тракторной промышленности используются дуговые сталеплавильные печи с кислой футеровкой из динаса (на основе  $\text{SiO}_2$ ). В них используется кислый шлак ( $\text{SiO}_2$ ). Такой процесс называют *кислым процессом*. Для этого используют дуговые печи сравнительно небольшой вместимости (до 10 т) мощностью 2–5 МВА. Длительность плавки при кислом процессе, как правило, не превышает 2,5 ч.



**Рис. 4.46. Примерный график изменения мощности и напряжения питания ДСП за плавку при выплавке стали основным процессом (полный металлургический цикл)**  
 Технологические стадии: I – загрузка; II – расплавление; III – окисление;  
 IV – скачивание шлака; V – рафинирование

Современные дуговые сталеплавильные печи, используемые в металлургической промышленности, значительно отличаются от описанных выше печей, как по конструкции, так и по реализуемому в них технологическому процессу. Они имеют большую удельную электрическую мощность до  $0,9 \dots 1,0$  МВА/т и более. Кроме того, в них широко используются различные средства интенсификации плавки, позволяющие вводить в печь дополнительную тепловую энергию. Из-за большой тепловой нагрузки, вместо футеровочных материалов в конструкции стен и свода используются водоохлаждаемые трубчатые панели. Для использования тепла отходящих газов реализуются разнообразные способы загрузки шихты и других материалов. Для выпуска металла в печи имеется эркер, в дне которого выполнено выпускное отверстие с шиберным затвором. Данная конструкция позволяет отсекай шлак при выпуске металла и уменьшить угол наклона печи для выпуска металла. Благодаря этому сталеразливочный ковш устанавливается на стелевозе, что позволяет уменьшить длину открытой струи металла и снизить охлаждение и окисление металла на выпуске из печи.

Для обеспечения максимальной производительности в дуговой печи металлолом расплавляют и проводят окислительный период, удаляя фосфор и избыток углерода. В таких печах шлак наводят один раз за плавку и выплавляют полупродукт, который затем доводят до требуемого химического состава в агрегате ковш-печь (АКП). На рисунке 4.47 представлен график изменения мощности  $P_d$  и тока  $I_d$  дуг в сверхмощной ДСП вместимостью 180 т. Как видно из графика, печь работает с тремя завалками шихты за плавку. Длительность цикла плавки в этой печи около 50 мин благодаря использованию различных средств интенсификации плавки, которые рассмотрены ниже.

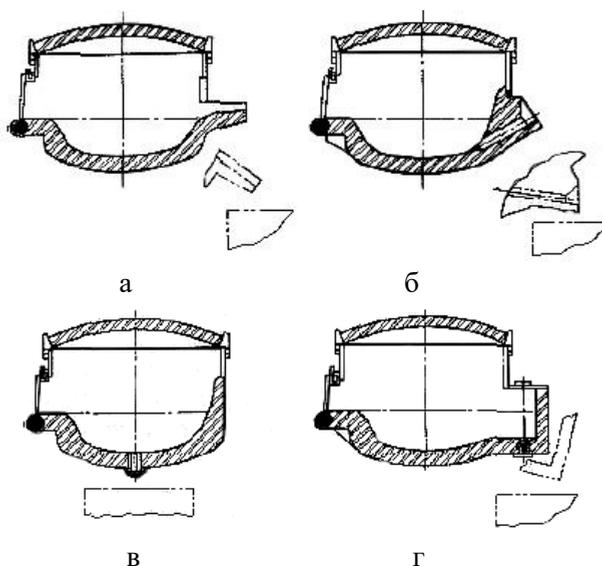


**Рис. 4.47.** График изменения мощности  $P_d$  и тока  $I_d$  дуг в сверхмощной ДСП вместимостью 180 т, выплавляющей полупродукт

Различие режимов и особенностей технологического процесса в печах литейного класса и ДСП, работающих на металлургических производствах, нашло отражение в конструкции дуговых печей. На рисунке 4.48 показаны профили ванн различных печей. Если в литейных цехах машиностроительных предприятий используются преимущественно печи с выпуском через сливной носок, реже — с сифонным выпуском, то на металлургических предприятиях как правило используются печи с эркерным выпуском металла.

Из-за большой удельной электрической мощности металлургических ДСП, интенсивного использования дополнительных химических источников тепловой энергии огнеупорная футеровка, используемая в литейных ДСП, в сверхвысокомощных металлургических печах не может выдержать тепловых нагрузок. Поэтому вместо футеровки стен и свода в металлургических ДСП устанавливают водоохлаждаемые стальные панели и водоохлаждаемые своды.

Отличие коснулось и конструкции электрододержателей. На трехфазных дуговых печах литейных производств, как правило, используются электрододержатели, расположенные в одной горизонтальной плоскости, что приводит к тому, что взаимная индуктивность соседних фаз значительно отличается от взаимной индуктивности крайних фаз.



**Рис. 4.48. Профили ванн ДСП литейного класса:**  
 выпуск через сливной носок – а, сифонный выпуск – б;  
 и металлургического класса: донный выпуск – в, эркерный выпуск – г

Поэтому при такой конструкции электрододержателей наблюдается сильный перенос мощности между фазами. Токоведущая часть таких электрододержателей выполнена из медных водоохлаждаемых трубошин, электрически изолированных от несущей металлоконструкции. В более крупных ДСП, каковыми являются металлургические печи, используются токоведущие электрододержатели из меди или алюминия, расположенные по триангулированной схеме, как показано на рис. 4.49. При этом расстояние между всеми тремя фазами примерно одинаковое и, соответственно, одинакова взаимная индуктивность между фазами, что позволяет существенно снизить эффект переноса мощности между фазами.

Рассмотрим различные средства интенсификации плавки, используемые для повышения производительности, снижении удельного расхода электроэнергии, повышения качества продукции. Современные средства интенсификации плавки в ДСП охватывают разнообразные энерготехнологические и конструктивно-технологические аспекты.

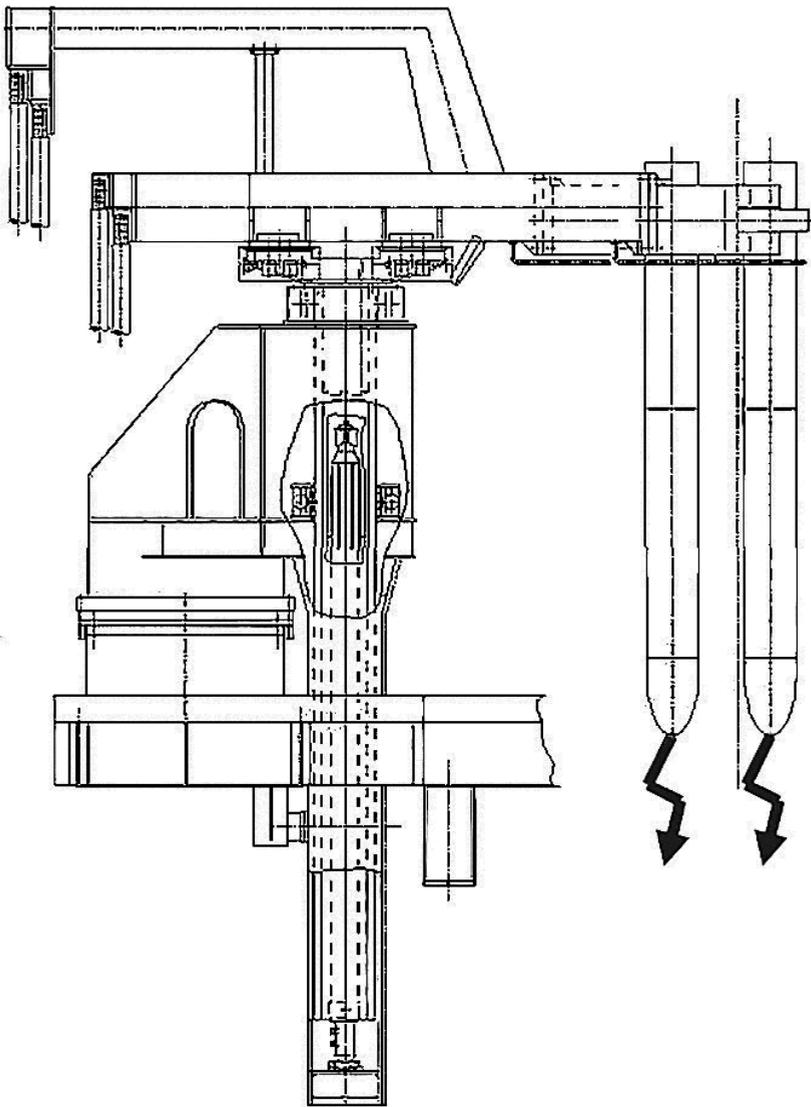


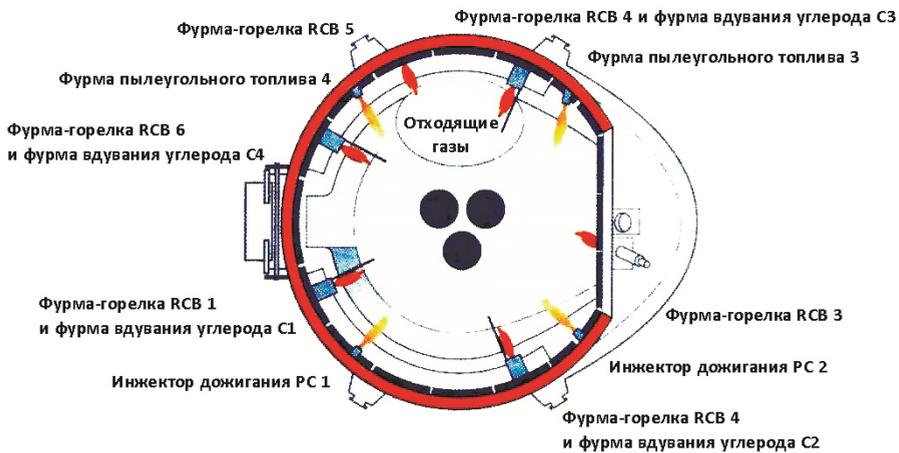
Рис. 4.49. Триангулированные электрододержатели крупной ДСП

#### *4.2.3. Энерготехнологические средства интенсификации плавки в ДСП*

К ним можно отнести: интенсификацию продувки кислородом, использование альтернативных источников энергии, дожигание отходящих газов и формирование пенного шлака. На рисунке 4.50 показан пример расположения инжекторов, фурм и горелок на печи вместимостью 300 т и их работа.



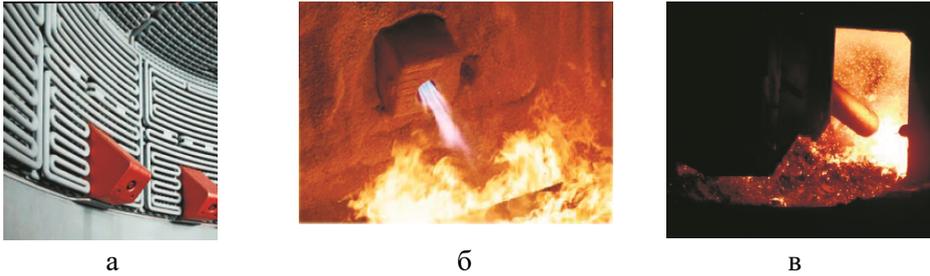
а



б

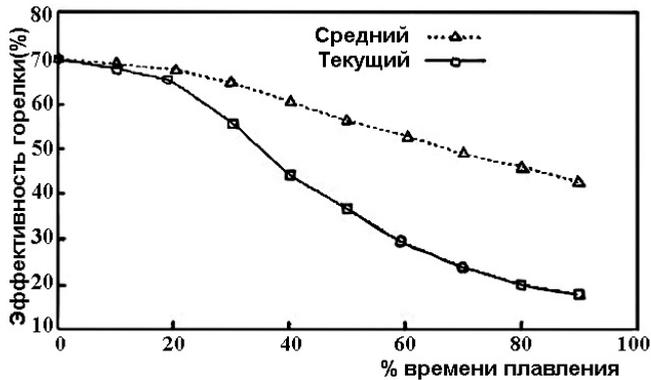
**Рис. 4.50. Кислородные инжекторы и фурмы-горелки в ДСП Ultimate 300т:**  
а – фото; б – схема расположения в печи

Вдувание угольного порошка и кислорода приводит к вспениванию шлака, что обеспечивает экранирование излучения дуги на стены и свод печи. Это позволяет на завершающей стадии расплавления не снижать мощность печи и сокращает длительность плавки. Процесс удаления из печи отработанного шлака благодаря его подвижности значительно упрощается. Использование пылеугольного топлива (или другого органического топлива) и дожигание в печи образующегося СО дают дополнительную прибавку в приходную часть энергетического баланса и также позволяют сократить длительность плавки. Современные ультразвуковые инжекторы, расположенные, как показано на рис. 4.51 в стеновых панелях, позволяют практически на любой стадии плавки вводить кислород непосредственно в металлическую ванну.



**Рис. 4.51. Использование виртуальных фурм-горелок, расположенных в трубчатых водоохлаждаемых стеновых панелях (а, б) и в рабочем окне (в) ДСП**

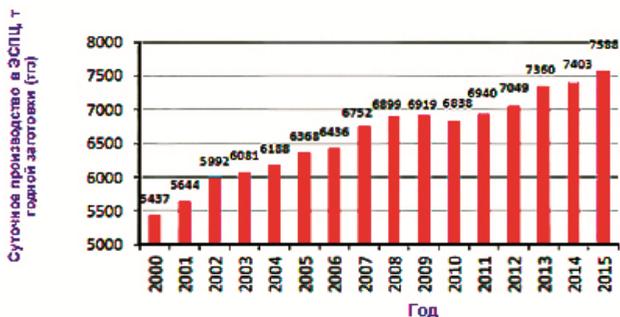
Соотношение мощностей, вводимых в печь: электрической, выделяемой в результате протекания химических реакций при использовании альтернативных источников энергии, должно тщательно выбираться с учетом особенностей конкретного производства. Дело в том, что использование горелок эффективно только в начале плавки, когда шихта холодная. По мере нагрева шихты ее температура приближается к температуре факела горелки и использование горелок приносит больше вреда, чем пользы, поскольку усиливает угар металла, повышает запыленность печных газов и их температуру, а вносимое горелками тепло металлической ванны почти не усваивается. На рисунке 4.52 показано изменение эффективности использования горелок в течение плавки в ДСП по мере нагрева и плавления шихты по данным [23].



**Рис. 4.52. Изменение эффективности использования горелок в течение плавки в ДСП**

Изменение объема суточного производства стальной заготовки и характерные значения процентных соотношений электрических и химических мощностей, вводимых в ДСП вместимостью 100 т на заводе BSW (Германия) в процессе

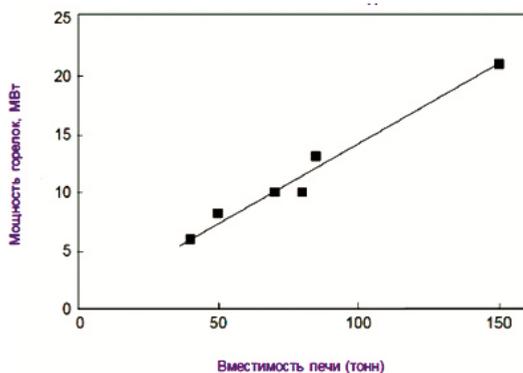
совершенствования производства на протяжении ряда лет, показано на рис. 4.53 а, б. На рисунке 4.53 в приведена зависимость мощности используемых горелок от вместимости ДСП.



а



б



в

Рис. 4.53. Рост производства стали и снижение расхода энергии путем оптимизации использования электрической и химической энергии по данным фирмы BSE (Германия) – а; соотношения электрических и химических мощностей, вводимых в ДСП – б; зависимость мощности горелок от вместимости ДСП – в

Зависимость мощности используемых горелок от вместимости ДСП [23] отражает то, что для плавки металла наибольшей энергетической эффективностью обладает электрическая дуга. При этом ограниченное использование альтернативных источников энергии, особенно в начале плавки позволяет повысить экономические показатели процесса плавки. К ним можно отнести применение металлизированного сырья и жидкого чугуна в качестве сырья, печи с шахтной и непрерывной загрузкой шихты, работу с болотом, эркерный выпуск металла и донную продувку ванны, дуговые печи постоянного тока.

Использование жидкого чугуна, горячебрикетированного железа и металлизированных окатышей позволяет решить сложную проблему – выплавку стали, чистую по содержанию цветных металлов, которые обычно попадают в сталь вместе с переплавляемым металлоломом. Кроме того, в ДСП не приходится тратить энергию на нагрев жидкого чугуна, что сокращает расход электроэнергии.

#### ***4.2.4. Конструктивно-технологические средства интенсификации плавки в ДСП. Дуговые печи постоянного тока***

Шахтная и непрерывная загрузка шихты используются для подогрева шихты отходящими от печи газами. Использование этих способов интенсификации, при всей их привлекательности, столкнулось с проблемой нейтрализации токсичных газов, образующихся при подогреве шихты. С учетом необходимости сооружения громоздких конструкций для теплообмена отходящих газов с шихтой и большой стоимости систем нейтрализации образующихся токсинов эффективность этих решений пока не установлена.

В крупных печах в конце плавки часть металла не сливается и остается в печи – это так называемое «болото». Наличие болота ускоряет нагрев и расплавление загружаемой в печь металлошихты. Благодаря повышению температуры в начале периода расплавления дуга имеет большую длину. Это обеспечивает более спокойный электрический режим, что повышает среднюю вводимую в печь мощность и сокращает длительность расплавления шихты. С самого начала плавки наличие жидкой металлической ванны позволяет начать окислительный процесс, что позволяет к окончанию расплавления закончить и процесс десульфурации. Донная продувка ванны аргоном через вмонтированные в дно пористые пробки обеспечивает дополнительное перемешивание жидкого металла и удаление из него неметаллических включений. Отсекаемый расположенным в эркере шиберным затвором шлак остается в печи на следующую плавку. Это позволяет раньше запустить реакции между металлической и шлаковой ваннами и экономит время плавки.

Комплексное использование средств интенсификации плавки, наряду с прогрессивными техническими решениями и рациональной организацией технологического процесса позволили многократно сократить длительность цикла плавки в ДСП. Рекордный показатель установлен на заводе BSW в Германии, где за сутки в печи вместимостью 110 т были выполнены 51 плавка. Средняя длительность плавки 110 т металла составила 26 мин.

Дуговые печи постоянного тока (ДППТ) по конструкции близки к дуговым печам переменного тока, а по технологическим возможностям ближе к плазменным сталеплавильным печам (ПСП). ДППТ вместимостью 12 т показана на рис. 4.54. В отличие от ДСП печи постоянного тока имеют один сводовый графитированный электрод, расположенный по оси симметрии печной ванны. Сводовый электрод подключен к отрицательному полюсу питающего печь выпрямителя. В подине ДППТ вмонтированы подовые электроды, подключенные к положительному полюсу выпрямителя. Через подовые электроды ток подводится к расплавляемому металлу, который является анодом. Катодом служит сводовый графитированный электрод. Остальные конструктивные элементы ДППТ практически такие же, как у ДСП.



**Рис. 4.54. Дуговая сталеплавильная печь постоянного тока вместимостью 12 т производства фирмы «КОМТЕРМ», г. Москва («ВКМ-Сталь», г. Саранск)**

Расплавление шихты в ДППТ схематично показано на рис. 4.55. В ДППТ градиент напряжения дуги значительно меньше, а величина напряжения значительно выше, чем в аналогичной ДСП. Соответственно длина дуги в начале плавки в ДППТ в несколько раз больше, чем в ДСП. Рабочий торец электрода расположен выше основного слоя шихты, шихта, оплаваясь, образует широкий конус (а не узкие колодцы как ДСП), что обеспечивает стабильное горение дуги без коротких замыканий. При переходе анодного пятна с одного куска шихты на другой относительное изменение длины дуги кратно меньше, чем в ДСП. Поэтому колебания напряжения дуги в ДППТ также значительно ниже. Кроме того, ток дуги не изменяет своего направления и поддерживается неизменным по величине путем быстродействующего регулирования выпрямленного напряжения источника питания. После оседания шихты, для ограничения тепловых воздействий на свод и стены печи схема питания печи (условно показанная на рис. 4.55) от тиристорного выпрямителя автоматически переключается. При этом напряже-

ние на дуге снижается в 2 раза, ток увеличивается в 2 раза, а активная мощность остается на прежнем максимальном уровне. При необходимости, такое переключение можно повторить. Данное решение позволяет более полно использовать установленную мощность источника питания с целью повышения производительности печи.

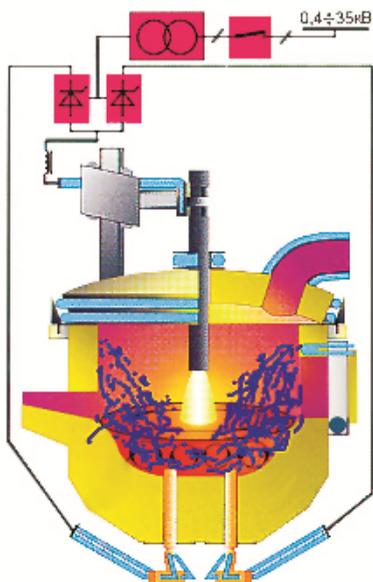


Рис. 4.55. Схема ДППТ с тиристорным источником питания

Еще большую стабильность дуга имеет при использовании источников питания, выполненных на IGBT-транзисторах, выполненных по схеме импульсного преобразователя напряжения. В этом случае, как видно на рис. 4.4, дуга по своей устойчивости сходна с дуговым разрядом плазмотрона. Такие источники питания имеют исключительно высокие энергетические характеристики и мягкий режим потребления электроэнергии, что позволяет подключать их к маломощным электрическим сетям (включая автономные генераторы) и существенно снизить платежи за энергоносители. На протяжении всей плавки источник питания обеспечивает высокую стабилизацию тока и мощности электрической дуги. При этом колебания температуры и давления в печи минимальны, следовательно, и газообмен с окружающей средой сведен к минимуму. Устранение причин окисления металлошхты и легирующих элементов позволяет снизить их расход (металлошхты на 7%, а легирующих при переплаве легированной шхты на 20%), а также уменьшить запыленность отходящих газов в 8 раз) и минимизировать газовыделения из печи. Стабилизация тока дуги обеспечивает снижение расхода электродов до 2,5...3 кг на тонну выплавленной стали. Шум при работе ДППТ снижается до уровня санитарных норм.

Как было показано в разделе 4.1.12 использование подовых электродов специальной конструкции позволяет получить эффективное электромагнитное перемешивание жидкой металлической ванны, что интенсифицирует металлургические реакции и сокращает технологические периоды плавки.

В дуговой электропечи при полном технологическом цикле плавки полная установленная мощность источника электропитания используется только в период расплавления. В периоды доводки жидкого металла (окислительный и восстановительный периоды плавки), продолжительность которых составляет около половины общего цикла плавки, в печь вводится часть номинальной мощности источника электропитания, что приводит к низкому использованию установленной мощности источника и неравномерной загрузке питающей электросети.

В отличие от дуговых печей переменного тока современные дуговые печи постоянного тока в ряде случаев позволяют ликвидировать этот недостаток при использовании варианта так называемой «сдвоенной» печи. Принцип перераспределения мощности источника питания показан на рис. 4.56.

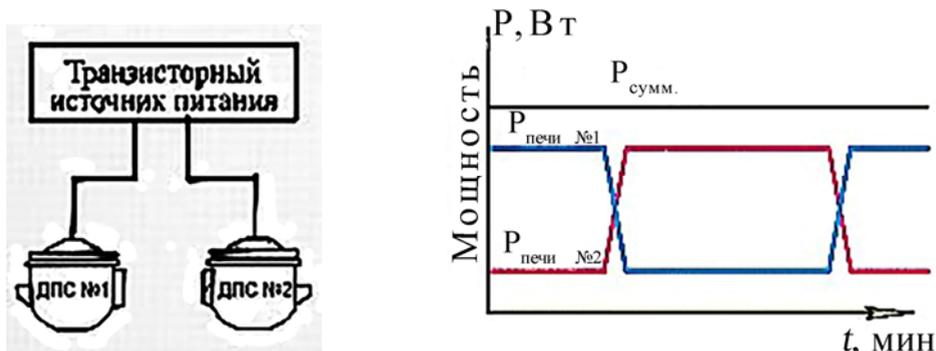


Рис. 4.56. Схема подключения и принцип перераспределения мощности в сдвоенном агрегате

В сдвоенном агрегате одновременно работают обе печи, а мощность источника питания произвольно делится между ними. При равной мощности и стоимости источника питания данное решение позволяет по сравнению с двумя отдельными печами: увеличить производительность на 40% и более, выдавать металл более равномерно по времени или, при необходимости, удвоить единовременную порцию металла, сделать график потребления энергии из сети более равномерным и тем самым снизить платежи за электроэнергию.

По сравнению с энерготехнологическими средствами интенсификации применение ДППТ имеет важное преимущество, заключающееся в сокращении углеродного следа, при выплавке стали. Ценность этого преимущества позволяет рассматривать выплавку стали в ДППТ как «зеленую» технологию, одну из наиболее перспективных в металлургии. В мире работают сотни дуговых печей постоянного тока, включая самую крупную сталеплавильную печь вместимостью 420 т.

Технологические особенности дуговых печей постоянного тока ярко проявились при освоении в них плавки алюминиевых сплавов. В дуговой печи переменного тока плавка алюминия практически невозможна из-за большого угара алюминия. В отличие от этого, в ДППТ, как показала их промышленная эксплуатация, угар алюминия на уровне 1% – такой же, как в индукционных печах. По сравнению с индукционными печами ДППТ, выплавляющие алюминиевые сплавы, показывают в 3 раза большую производительность и на 27% более низкий расход электроэнергии [24, 25]. При этом качество выплавляемого металла существенно выше, чем во всех других типах плавильных печей. ДППТ очень удобны для литейных производств, работающих неполным сменным циклом, так как обеспечивают выдачу жидкого металла уже через 30 мин после начала плавки. В этих печах успешно осуществляется безотходная переработка отходов алюминия и его сплавов, алюминиевого лома, стружки, переработки шлаков, содержащих алюминий, благодаря их высоким технологическим характеристикам, позволяющим извлечь из отходов до 98% алюминия.

Особенности высокостабильного дугового разряда на постоянном токе позволили создать принципиально новую вращающуюся печь косвенного дугового нагрева тип ДПВ (рис. 4.57), предназначенную для обжига порошкообразных и кусковых материалов, дуговой плавки и проведения твердофазных, гетерофазных и жидкофазных эндотермических окислительно-восстановительных реакций. В этой печи, благодаря использованию высокостабильного дугового разряда постоянного тока и уплотнению рабочего пространства обеспечивается восстановительная или иная контролируемая атмосфера.

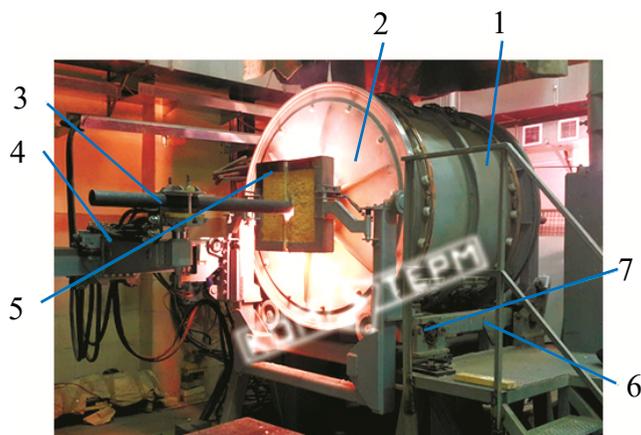


Рис. 4.57. Дуговая вращающаяся печь ДПВ-0,1 фирмы «КОМТЕРМ» [26]

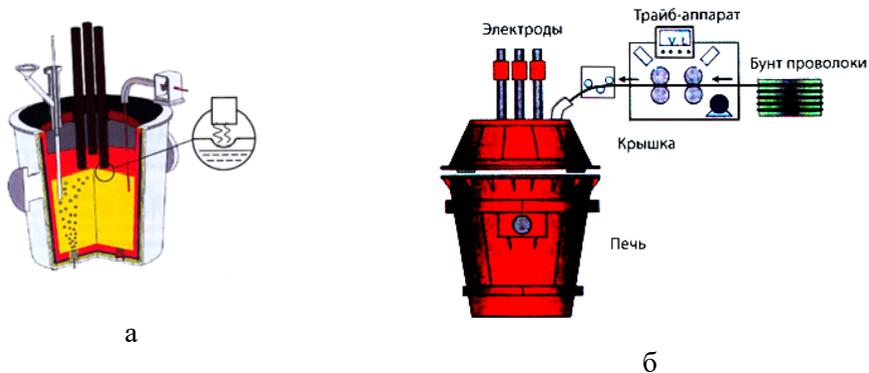
Печь имеет цилиндрический кожух 1. В торцевых стенках 2 корпуса выполнены проемы, через которые в камеру печи пропущены два графитированных электрода 3. Механизмы 4 перемещения электродов обеспечивают перемещение электродов вдоль оси вращения кожуха печи. Проемы в торцах кожуха имеют уплотнения 5, конструкция которых позволяет загружать внутрь печи исходные

материалы и выгружать полученные продукты переработки. Выгрузка полученных прокаленных сыпучих материалов и слив жидких продуктов производится путем наклона основания печи 6 (вместе с цилиндрическим кожухом) вокруг шарнира 7, ось которого перпендикулярна оси вращения печи.

Важной особенностью печи ДПВ является каскадное механическое перемешивание находящихся в печи материалов, высокая скорость их нагрева и равномерность температуры. Замеры показали, что разброс температуры не превышает 10°C. Печь может использоваться как электрокальцинатор для высокотемпературного прокаливания дисперсных материалов, для металлизации рудных материалов, для высокотемпературного пиролиза и решения других задач.

#### 4.2.5. Агрегат ковш-печь

Как указывалось выше для доводки по химическому составу полупродукта, получаемого в металлургических дуговых сталеплавильных печах по одношлаковой технологии, используется агрегат ковш-печь (АКП). На рисунке 4.58 показаны схема АКП (слева) подачи порошковой проволоки с помощью трайб-аппарата (справа) для ввода легирующих добавок и корректировки химического состава металла в ковше.



в

Рис. 4.58. Схема АКП (а) и подачи в него порошковой проволоки с помощью трайб-аппарата (б), а также фото АКП в работе

На схеме АКП показан сталеразливочный ковш, наполненный металлом, поверх которого наведен шлак. На рабочих торцах частично погруженных в шлак электродов горит электрическая дуга, которая нагревает шлак и металл в ковше. В днище ковша вмонтированы пористая пробка, через которую продувается аргон, а также выпускное отверстие с шиберным затвором. На случай, если пористая пробка зашлакуется и перестанет пропускать аргон, в крышке АКП установлена погружная фурма для аварийной продувки металла аргоном.

Выплавка стали дуплекс-процессом при получении полупродукта в ДСП и его доводке в АКП является в настоящее время основной технологической схемой, используемой для получения электростали. При необходимости глубокого удаления газов или получения особо низкого содержания углерода эту схему дополняют вакууматором, чаще всего камерного типа. В соответствии с такой схемой после АКП ковш устанавливают в вакуумную камеру, в которой после откачки выполняют дополнительные технологические операции.

В дуговых сталеплавильных печах сочетаются особенности электроэнергетических и теплотехнических установок. Поэтому эффективным способом оптимизации энерготехнологических процессов и режимов печей является метод анализа их энергетического баланса.

Уравнения энергетического баланса составляют для всего цикла плавки или для ее отдельных периодов. На рисунке 4.59 приведен характерный энергетический баланс современной сверхмощной дуговой печи для всего цикла плавки стали [27].

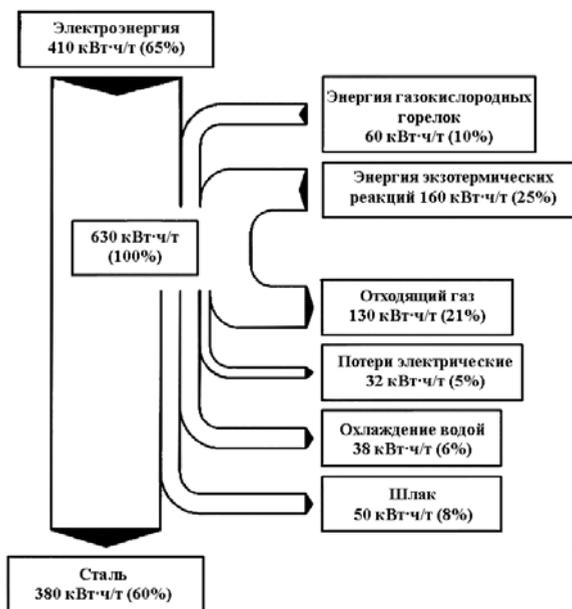


Рис. 4.59. Типичный энергетический баланс плавки стали в современной сверхмощной дуговой печи

Общее количество вводимой в рабочее пространство электроэнергии составляет 630 кВт·ч/т, при этом только 65% (410 кВт·ч/т) вносится электроэнергией. Газокислородными горелками вносится 10%, а экзотермическими реакциями окисления элементов шихты: углерода, железа, кремния, марганца, попадающей в шихту органики – около 25%.

Полезно расходуемая энергия, идущая на нагрев и расплавление стали, составляет около 60 % от всей вносимой энергии. Остальные 40 % – это потери. Систематический анализ и сокращение потерь позволяет добиться минимизации расхода энергии на выплавку стали.

В таблице 4.2 приведены сравнительные данные по дуговым сталеплавильным печам переменного и постоянного тока литейного класса, выпускаемых российской фирмой «КОМТЕРМ» ( $S$ ,  $P_a$ ,  $P$  – соответственно полная, максимальная активная и полезная мощности печи,  $\eta_{эл}$  – электрический к.п.д.).

Из сравнения следует, что при одинаковой установленной полной мощности трансформатора полезная мощность печи постоянного тока на 17–44% выше, чем такой же по полной мощности печи переменного тока благодаря более высокому коэффициенту мощности и электрическому к.п.д. Повышение полезной мощности позволяет повысить производительность печи. Эти преимущества сильнее проявляются при комплектации печи источником питания, выполненным на базе IGBT-транзисторов.

Таблица 4.2

### Сравнение дуговых сталеплавильных печей переменного и постоянного тока

Вместимость печи G, т	0,5	1,5	3	6	12	15	25	
$S$ , МВА	0,8	1,6	2,5	5,0	9,6	12,8	18,0	
Тип преобразователя ДППТ	Транзисторный				Тиристорный			
$P_{a \text{ пост}}$ , МВт	0,76	1,52	2,38	4,75	8,16	10,9	15,3	
$P_{a \text{ пер}}$ , МВт	0,58	1,09	1,72	3,79	6,94	–	13,5	
$\eta_{эл.пер}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
$\eta_{эл.пост}$	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	–	0,93	
$P_{\text{пост}}$ , МВт	0,71	1,42	2,21	4,42	7,69	9,95	14,2	
$P_{\text{пер}}$ , МВт	0,52	0,98	1,55	3,40	6,24	–	12,1	
$P_{\text{пост}} / P_{\text{пер}}$	1,36	1,44	1,43	1,30	1,23	–	1,17	
$P_{\text{пост}} / S$	0,88	0,88	0,88	0,88	0,80	0,79	0,79	
$P_{\text{пер}} / S$	0,65	0,61	0,62	0,68	0,65	–	0,67	

В таблице 4.3 представлены данные [27] по современным ДСП переменного тока средней и большой вместимости, установленных в России. Мировой опыт использования дуговых сталеплавильных печей постоянного и переменного тока различной конструкции приведен в [28].

**Конструкция, основные параметры и показатели ДСП вместимостью от 30 до 180 т**

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	ДСП-30	ДСП-40	АДСП-50	ДСП-50	ДСП-60	1ДСП-80	ДСП-90	ДСП-100	ДСП-100 (№2)	ДСП-120	ДСП-120	ДСП-180
1	Емкость печи (по выпуску)	т	30	40	50	50	60	80	90	100	110	120	120	180
2	Мощность трансформатора (номинальная)	МВА	26	40	25	40	40	85	75	60	95	80	100	150
3	Тип выпуска	–	Эркер	Эркер	Сифон	Эркер	Донный эксцентр	Эркер	Эркер	класс	Эркер	Эркер	Эркер	Эркер
4	Пределы вторичного напряжения	В	296/620	296/818	133/429	500/900	500/900	578/1000	551/996	288/697	343/981	288/697	738/1021	800/1400
5	Диаметр электродов	мм	400	450	500	500	508	610	610	610	610	610	610	610
6	Диаметр распада электродов	мм	1000	1050	1150	1050	1050	1250	1250	1300	1300	1300	1200	1200

Продолжение табл. 4.3

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	ДСП-30 Ярцевский ЛПЗ	ДСП-40 Ярцевский ЛПЗ (проект)	АДСП-50 «Вологда-ФТЭС»	ДСП-50 «Новороссталль»	ДСП-60 ЗАО «Кама-сталь»	ДСП-80 Серовский метзавод	ДСП-90 РЭМЗ	ДСП-100 ЭСПЦ-2 ЧМК	ДСП-100 (№2) НКМК	ДСП-120 ЭСПЦ-6 ЧМК	ДСП-120 НСММЗ	ДСП-180 ММК
7	Отношение диаметров распада и электрода	–	2,5	2,33	2,3	2,1	2,07	2,05	2,05	2,13	2,13	2,13	1,96	1,97
8	Диаметр рабочего пространства (по панелям)	мм	4630	5000	4410	5000	5800	5900	6180	6800	6500	6800	6900	7500
9	Отношение диаметра рабочего пространства к диаметру распада электродов	–	4,63	4,76	3,83	4,76	5,52	4,72	4,94	5,23	5,0	5,23	5,75	6,25
10	Высота рабочего пространства печи (от порога до верха стен)	мм	1710	2180	1840	2330	2500	2800	2840	2300	2920	2860	3070	3460
11	Глубина ванны	мм	680	900	1050	1100	1100	1150	1190	1410	1370	1420	1180	1590

Окончание табл. 4.3

№ п/п	№ Характеристика	Единица измерения	ДСП-30 Ярцевский ЛПЗ	ДСП-40 Ярцевский ЛПЗ (проект)	АДСП-50 «Вологда-ФТЭС»	ДСП-50 «Новороссы-металл»	ДСП-60 ЗАО «Кама-сталь»	1/ДСП-80 Серовский метзавод	ДСП-90 РЭМЗ	ДСП-100 ЭСПЦ-2 ЧМК	ДСП-100 (№2) НКМК	ДСП-120 ЭСПЦ-6 ЧМК	ДСП-120 НСММЗ	ДСП-180 ММК
12	Диаметр ванны	мм	3880	3950	3780	4150	4450	5000	5150	5350	4900	5300	5750	6350
13	Толщина подины	мм	990	600	645	800	750	652	700	850	830	800	750	800
14	Отношение толщины к глубине ванны	–	1,46	0,67	0,67	0,73	0,68	0,57	0,59	0,6	0,61	0,57	0,64	0,50
15	Объем рабочего пространства печи (без эркерной части)	м³	35	46	35	48	55	90	93	95	106	118	135	184
16	Расстояние от оси печи до оси отверстия	мм	3050	2640	–	2750	1970	3350	3600	–	3970	4100	3800	4020

### 4.3. Руднотермические печи (РТП) и процессы

*Руднотермические* или *рудовосстановительные печи* (РТП, РВП) предназначены для проведения восстановительных электротермических процессов, с помощью которых получают, в частности, чистые металлы, сплавы металлов, химические соединения из руд, содержащих эти металлы в виде окислов, карбонатов или соединений с серой. Так, из FeO получают чугун (процесс, аналогичный доменному, так называемые *электродомны*), из кремнезема SiO<sub>2</sub> – кремний, из MoO<sub>3</sub> – молибден, из извести CaO – карбид кальция CaC<sub>2</sub>, и т.д.

Часто в РТП получают не чистые металлы, а их сплавы с железом – *ферросплавы* (ферросилиций, феррохром, ферромарганец, ферросиликомарганец и др.), применяемые при выплавке стали в качестве легирующих добавок и раскислителей. Развитие металлургии качественных сталей в России довольно долгое время сдерживалось тем, что после распада СССР большинство ферросплавных производств оказалось за пределами РФ (Запорожье и Никополь в Украине, Зестафони в Грузии, Тораз и Джамбул, Аксу, Джебказган в Казахстане и другие). С середины 2000-х гг. производство ферросплавов в России увеличивается, расширены ферросплавные производства на Новокузнецком металлургическом комбинате, Алапаевском (Свердловская область) металлургическом заводе, построены специализированные современные ферросплавные заводы в Тихвине (Ленинградская область), Братске (Иркутская область).

РТП также широко используются для получения фосфора (для удобрений и других химических соединений), карбида кальция (некоторые виды удобрений, производство ацетиленового газа, используемого в газовой сварке, производство сажевого углерода), никелевого штейна (полуфабрикат в производстве металлического никеля). Кроме того, в РТП получают чистый кремний (сырье для микроэлектронной промышленности), алунд и карборунд (абразивные и огнеупорные материалы), электрографит (электроды для ДСП), и т.д. Иногда в РТП только расплавляют материалы без проведения восстановительных реакций, так поступают, например, при плавке муллита (футеровка сталеплавильных печей, огнеупорное муллито-кремнеземистое волокно), базальта, каолина (минеральное волокно, литая посуда для химических реакций). РТП используется для обеднительной плавки, позволяющей отделить целевой продукт от пустой породы путем их расплавления, иногда с восстановлением одного их компонентов, и гравитационного разделения (титановый шлак, драгоценные металлы).

В РТП имеется два механизма преобразования электрической энергии в тепловую: часть энергии выделяется в электрических дугах, другая часть (джоу-лево тепло) – при протекании тока непосредственно по шихте.

В балансе энергии существенную роль играет тепло химических реакций. Таким образом, в РТП осуществляется смешанный нагрев – комбинация дугового нагрева и прямого нагрева сопротивлением. Тем не менее, существуют некоторые типы РТП, в которых практически отсутствует либо дуговая составляющая,

либо составляющая нагрева сопротивления. Так, в рафинировочных и рудовосстановительных печах, в которых получают малоуглеродистые ферросплавы и в рудовосстановительных печах, в которых требуется высокая концентрация мощности (например, кремний и кремнистые ферросплавы), большая часть мощности выделяется в дугах. Напротив, в графитировочных печах и печах для получения карборунда SiC дуги отсутствуют, и такая установка практически представляет собой печь сопротивления прямого нагрева.

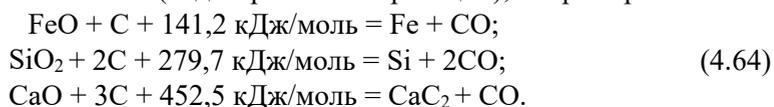
В отличие от ДСП, в которых, по существу, проводится лишь один процесс – выплавка стали, в РТП проводится множество процессов, каждый из которых оказывает влияние на электрические и геометрические параметры и конструктивные особенности печей. Поэтому создано много типов РТП, существенно отличающихся друг от друга, предназначенных для проведения различных процессов.

Рудовосстановительные процессы являются одними из самых энергоемких потребителей электроэнергии. Удельный расход электроэнергии в РТП достигает, в зависимости от технологического процесса, 2000–18 000 кВт·ч/т. Для сравнения, удельный расход при выплавке стали в ДСП составляет от 400 до 800 кВт·ч/т. Высокий по сравнению с ДСП расход электроэнергии РТП объясняется следующими причинами.

1. Температуры плавления большинства обрабатываемых в РТП материалов выше, чем у стали. Необходимость нагрева шихты до высокой температуры требует увеличения мощности.

2. Ряд руд загрязнен пустой породой для того, чтобы отделить эту породу от металла, превратив ее в шлак, нужно породу нагреть и расплавить, что также требует дополнительных затрат электроэнергии. При обработке таких руд образуется большое количество шлака (многошлаковые процессы).

3. В отличие от процессов выплавки стали, в РТП преобладают процессы, идущие с поглощением теплоты (эндотермические реакции), например:



Во всех этих процессах CO выделяется в атмосферу. Как видно, во всех этих реакциях восстановителем является углерод, такие процессы называются *карботермическими*. В качестве восстановителя в РТП также могут использоваться кремний или алюминий (*силикотермические* и *алюмотермические* процессы, например, алюмотермическое восстановление кальция). Шихта РТП представляет собой смесь руды и восстановителя (кокса, алюминия, кремния).

Для многих рудотермических процессов (получение массовых ферросплавов, чугуна, фосфора, карбида кальция, никелевого штейна) характерны большие объемы производства, поэтому используются крупные и мощные (до 100 МВА и более) печи. Для таких печей серьезными становятся проблемы загрузки шихты, слива продукта и удаления выделяющихся при технологическом процессе газов. Из-за больших объемов загружаемых материалов, высокой темпе-

ратуры колошника (поверхности шихты), выделения окиси углерода, догорающей на колошнике до  $\text{CO}_2$ , требуются специальные решения для механизации работ на печи и улучшения условий труда персонала. Для РТП характерны большие выбросы пыли, для очистки отходящих газов от пыли используют фильтры различной конструкции: электрофильтры, рукавные фильтры, сухие и мокрые циклоны и другие газодинамические аппараты, пенные фильтры. Известны решения, позволяющие утилизировать энергию горячих отходящих газов с получением тепла (как с использованием теплообменников газ–вода, так и путем сжигания газа, содержащего большое количество окиси углерода, в котле-утилизаторе) и электроэнергии (газовые мини-турбины). В некоторых случаях компоненты отходящих газопылевых выбросов могут быть использованы как ценное сырье, например для получения микросилики, сухого льда и прочих продуктов.

Шлаки, образующиеся в РТП, могут быть использованы для дорожного строительства, рекультивации земель и в других целях.

В большинстве РТП, в отличие от ДСП, технологический процесс является непрерывным, т.е. отсутствуют выраженные циклы плавки. Печь подключена к питающей сети постоянно, периодически или непрерывно осуществляются загрузка новых порций шихты и слив расплава. В ремонт печи выводятся не чаще, чем раз в 1–2 года, поэтому конструкция печи должна быть весьма надежной, а элементы конструкции, подвергающиеся интенсивному нагреву, делаются водоохлаждаемыми.

Электрический режим РТП (кроме рафинировочных печей с открытой дугой) спокоен по сравнению с ДСП, поскольку электрическая дуга шунтируется проводящей шихтой. Кроме того, дуга, горящая под слоем шихты, хорошо теплоизолирована и поэтому устойчива, форма тока и напряжения довольно близка к синусоидальной. Ток довольно стабилен, технологические короткие замыкания отсутствуют.

Как уже говорилось, проводимые в РТП процессы разнообразны, соответственно различны и конструкции, геометрические и электрические параметры печей. Однако можно выделить четыре основные группы процессов.

#### ***4.3.1. Бесшлаковые и шлаковые процессы (получение ферросилиция, ферромарганца, углеродистого феррохрома, карбида кальция)***

Печи для таких процессов (рис. 4.60) трехфазные, непрерывного действия. Загрузка осуществляется сверху. Слив расплава осуществляется через летки 8, которые закрыты огнеупорными пробками, для выпуска расплава пробку пробивают инструментом, прожигают газовой горелкой или электрической дугой с использованием специального устройства. Обычно ванна в плане (при виде сверху) круглая, электроды размещаются в вершинах равностороннего треугольника,

чтобы избежать выраженной несимметрии по фазам. Электроды 1 погружены в шихту, они зажаты в электрододержателях 2, связанных с механизмом перемещения электродов.

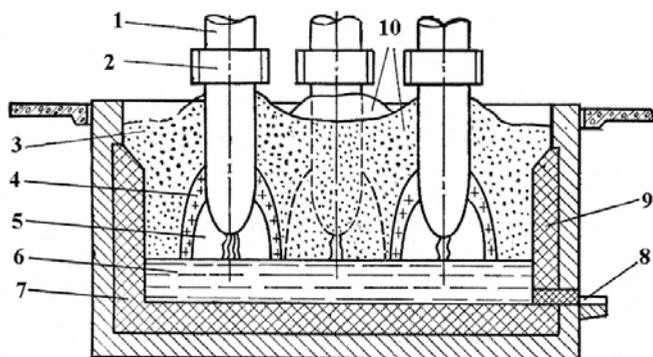


Рис. 4.60. Схема печи для бесшлакового процесса

Дуги горят под слоем шихты в проплавленных полостях 5, образующихся у нижних концов электродов 1. Полости заполнены выделяющимися газами. На всей поверхности шихты, обращенной в полость, образуется тонкий слой полурасплавленной шихты («тигель») 4, который поддерживается давлением газов, образующихся внутри тигля. Дуга горит между торцом электрода и жидким металлом (расплавом) 6. Реакции восстановления начинаются в толще колошника и завершаются непосредственно в стенках «тигля», восстановленный металл расплавляется на внутренней поверхности «тигля» и каплями стекает вниз, в жидкометаллическую ванну 6. Токи (называемые токами «звезды») протекают не только по дуге, но и от электрода к расплаву по стенкам «тигля» (которые являются хорошим проводником), шунтируя дугу. В «тигле» выделяется значительное количество джоулева тепла. Токи, протекающие непосредственно от электрода к электроду через шихту 10 (токи «треугольника»), могут быть значительными, поскольку в шихте содержится углеродистый восстановитель, а, в ряде случаев, и стальная стружка. Поэтому шихта может иметь достаточно высокую электропроводность. Наличие токов «треугольника» значительно затрудняет ведение технологического процесса, так как под их действием шихта в верхней части колошника может спечься. Это приводит к нарушению непрерывного схода шихты, ее зависанию и последующему обрушению, после чего раскаленные газы так называемыми «свищами» прорываются через колошник, что может привести к выходу из строя электрододержателей и свода, нарушает технологический процесс.

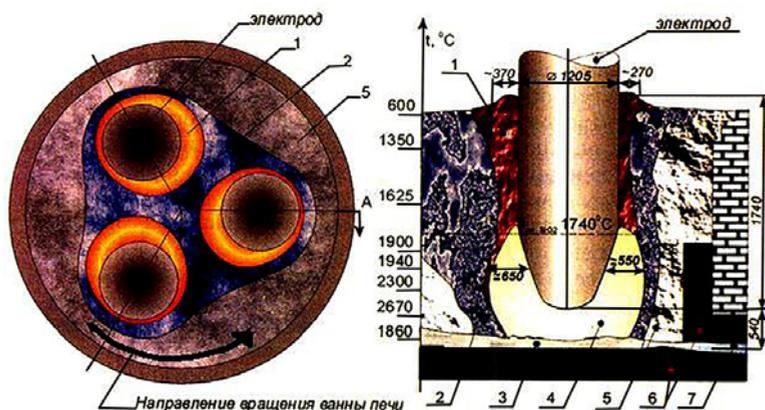
По мере расплавления шихты в «тигле» ее место занимает опускающаяся вниз шихта в областях вокруг электродов. Остальные участки шихты (у стен печи и между электродами) остаются неподвижными и в реакциях не участвуют, образуя гарниссаж (слой непрореагировавшей шихты), защищающий футеровку от перегрева. Поскольку опускается вниз и достигает реакционной зоны только шихта вблизи электродов, загрузку шихты следует проводить не по всей площади, а толь-

ко вокруг электродов, образуя вокруг них конусы 10. Благодаря этим конусам потоки отходящих газов (прежде всего CO) отклоняются от электродов и выходят на поверхность шихты на некотором расстоянии от электрододержателей 2, таким образом электрододержатели защищаются от воздействия горячего газа.

Стены печи 9 и ее подина 7 могут изготавливаться из керамических огнеупорных материалов, но в ряде случаев они изготавливаются из угольных блоков, выдерживающих более высокие температуры.

Более подробно строение рабочего пространства бесшлаковой печи на примере печи для выплавки кремния показано на рис. 4.61.

Печи могут строиться в открытом, полузакрытом и закрытом (герметичном) исполнениях. Шахта полузакрытой печи закрыта сверху металлическим водоохлаждаемым кожухом-зонтом. Закрытая печь герметизируется стальным водоохлаждаемым сводом, теплоизолированным с внутренней стороны.

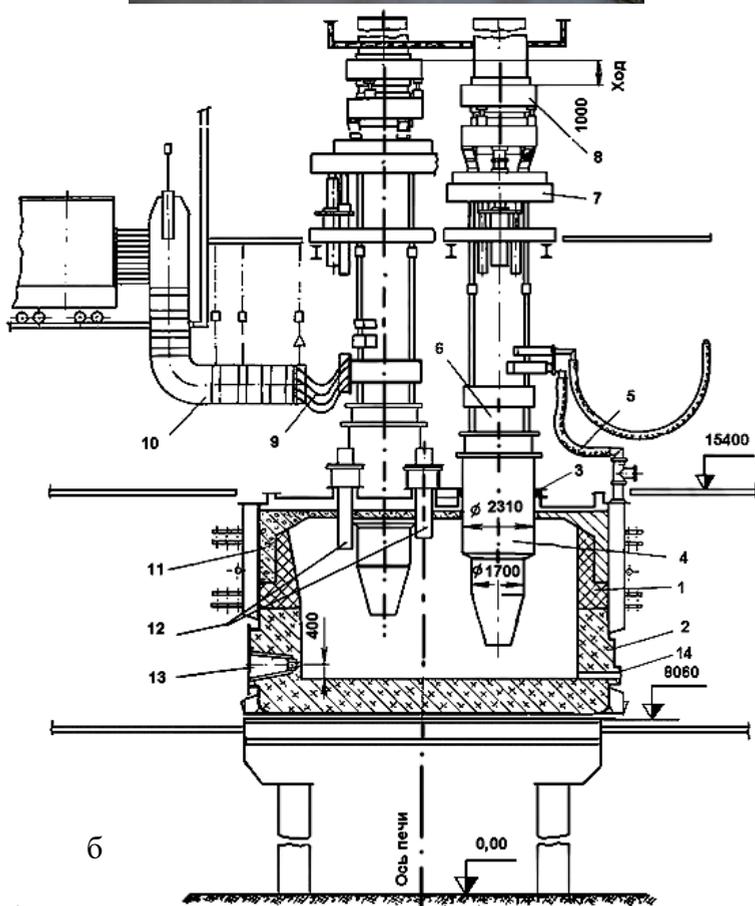


**Рис. 4.61. Рабочее пространство вращающейся печи для кремния:**

- 1 – зона наибольшего схода шихты; 2 – зона медленного схода шихты; 3 – «болото», зона расплавленного Si и шлако-карбидной смеси; 4 – газовая полость; 5 – гарниссаж; 6 – угольные блоки подины и обстановочные блоки; 7 – леточный канал

Закрытые и герметичные печи (рис. 4.62) оснащаются газоотводом из подсводного пространства и системой газоочистки, в таких печах возможно утилизировать большое количество теплоты, выделяющейся при сгорании окиси углерода. У закрытых печей тепловое излучение в окружающую среду и пылевые выбросы существенно меньше, чем у открытых, закрытые печи отличаются более высоким уровнем безопасности и лучшими условиями труда персонала. Однако при этом необходимо устранить опасность взрыва. **В случае попадания воздуха в наполненную окисью углерода закрытую печь образуется взрывоопасная смесь**, поэтому в печи должно постоянно поддерживаться чувствительной системой автоматического регулирования небольшое избыточное давление, исключающее проникновение воздуха в печь. Исполнительными органами системы регулирования могут являться заслонка, воздействующая на течение отходящих газов в газоотводе, и регулируемый электропривод газоотсоса.

а



б

**Рис. 4.62. Герметичные руднотермические печи:**

а – фото печи производства фирмы Тепова; б – схема печи РКЗ-80Ф для возгонки фосфора (разработка ВНИИЭТО, изготовление «СибЭлектротерм»):

- 1 – футеровка; 2 – кожух; 3 – установка сальников; 4 – цилиндр;
- 5 – система водоохлаждения; 6 – электрододержатель; 7 – гидropодъёмник;
- 8 – устройство для перепуска электродов; 9 – гибкий токопровод;
- 10 – короткая сеть; 11 – свод; 12 – загрузочные трубочки;
- 13 – шлаковая лётка; 14 – лётка для феррофосфора

Газы, отсасываемые из печи газоотсосом, охлаждаются и очищаются от твердых частиц (пыли) фильтрами (матерчатыми, мокрыми, электрофильтрами).

Известны бесшлаковые и шлаковые печи, работающие на постоянном токе. Например, бесшлаковая печь для получения кремния, мощностью 6,4 МВт разработанная ООО «НПФ «КОМТЕРМ», г. Москва. Использование в этой печи постоянного тока позволило повысить выход годного по целевому продукту, снизить расходы на восстановитель, уменьшить расход электродов, повысить коэффициент мощности установки.

Шлаковая печь для выплавки высокоуглеродистого феррохрома мощностью 72 МВт (рис. 4.63), поставлена в «ТНК «Казхром» (Казахстан) фирмой SMS SIEMAG (Германия). Печь предназначена для переработки пылеватых мелкодисперсных руд.

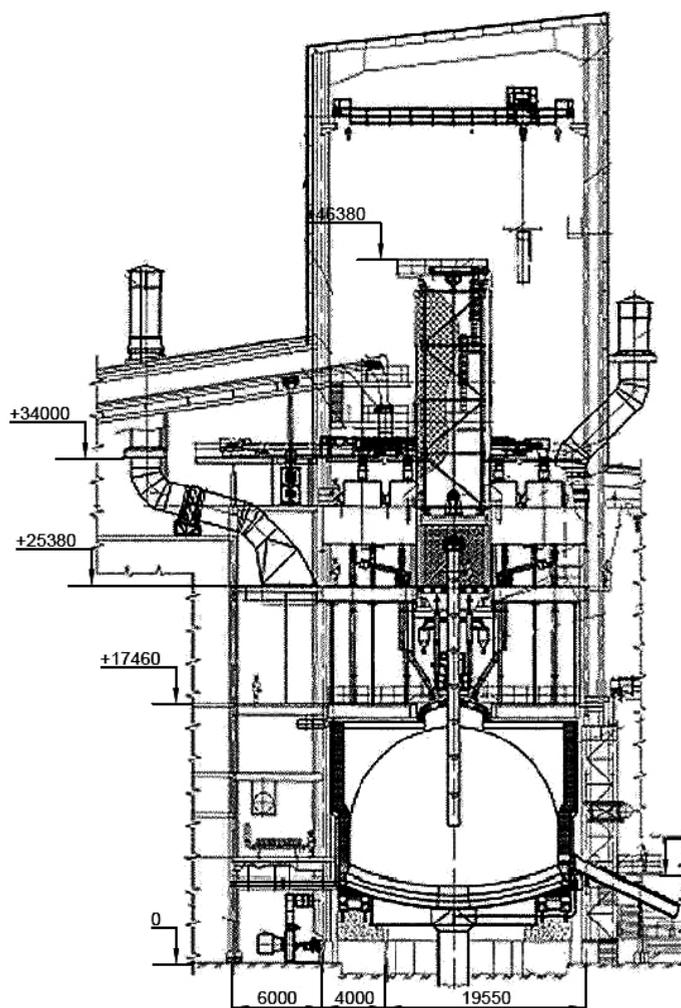
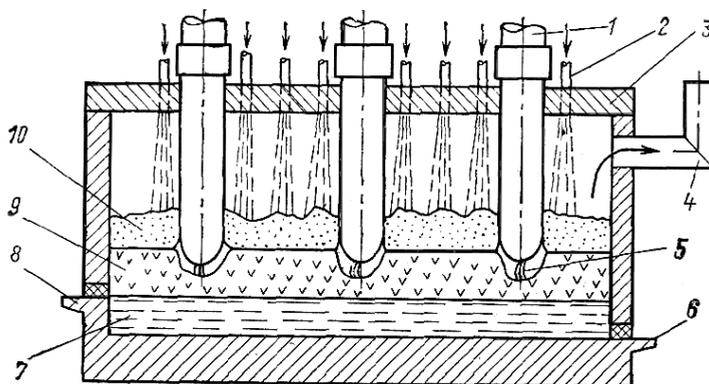


Рис. 4.63. РТП постоянного тока мощностью 72 МВт для выплавки углеродистого феррохрома, поставленная фирмой SMS SIEMAG в «ТНК «Казхром» (Казахстан)

**4.3.2. Многошлаковые процессы**  
**(получение ферромарганца, ферроникеля,**  
**никелевого штейна из руд с большим содержанием серы,**  
**получение фосфора и др.)**

Печи для многошлаковых процессов (рис. 4.64) также непрерывного действия, трехфазные, с тремя или шестью электродами 1. Металл и шлак выпускаются через отдельные летки 6 и 8 соответственно, летки для металла и шлака находятся на разных уровнях. На поверхности расплава 7 плавает толстый слой расплавленного шлака 9, ток проходит через дугу и шлак к расплаву. Для некоторых процессов (например, получение фосфора) наличие дугового разряда отрицательно сказывается на технологическом процессе. В этом случае поддерживают режим, при котором с электродов ток стекает непосредственно в жидкий шлак без образования дуги. Шихта заданного гранулометрического состава загружается через трубочки 2 на поверхность шлака и расплавляется в шлаке, где и протекают восстановительные реакции, восстановленный металл 7 собирается на подине. В печах для многошлаковых процессов не происходят бурные газопылевые выбросы, характерные для бесшлаковых и малошлаковых процессов при обвале стенок «тиглей».



**Рис. 4.64. Схема печи для многошлакового процесса**

Многошлаковые печи перекрыты футерованным сводом 3 и герметизированы, имеется вытяжка газов 4, поскольку отходящие газы таких печей обычно ядовиты. Интересно, что в печах для производства фосфора продукт (фосфор) получается в виде пара, который выходит из печи через вытяжку, конденсируется в теплообменнике и собирается.

Используются также многошлаковые обеднительные печи, работающие на постоянном токе, например, печь извлечения драгоценных металлов из отработанных автомобильных катализаторов, разработанная ООО «НПФ КОМТЕРМ», г. Москва (рис. 4.65), печи для переработки шлаков драгметалльных производств, разработки той же фирмы.

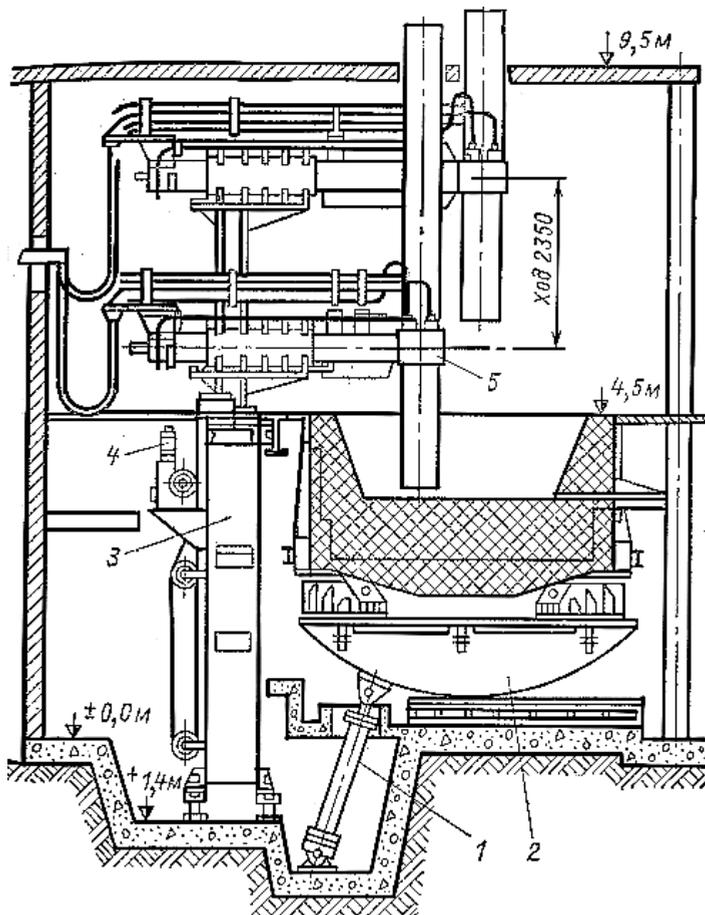


**Рис. 4.65. Реализация процесса извлечения драгоценных металлов из отслуживших автокатализаторов в руднотермической печи ДП-0,5 производства фирмы «КОМТЕРМ»**

### ***4.3.3. Процессы рафинирования или дугового переплава***

Указанные процессы используют для получения безуглеродистых или малоуглеродистых ферромарганца и феррохрома, никеля; расплавление муллита, кремнезема, каолина, базальта в производстве теплоизоляционных и огнеупорных материалов, включая волокнистые.

В отличие от вышеописанных, эти процессы являются периодическими: в печь загружают шихту, расплавляют ее, рафинируют (очищают) для получения требуемого химического состава и, затем, сливают продукт и шлак. Для удобства слива рафинировочные печи (рис. 4.66) выполняют наклоняющимися. Используют графитовые электроды, ванну печи футеруют магнезитом.



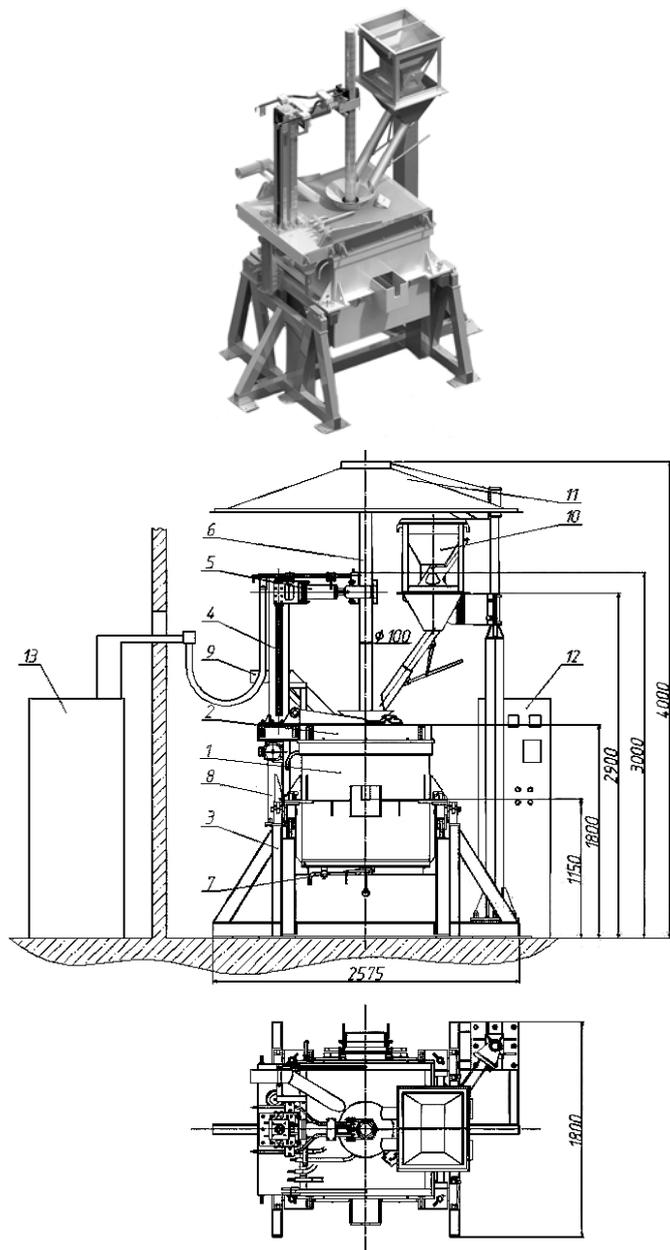
**Рис. 4.66. Схема рафинировочной печи**

1 – механизм наклона; 2 – опорный сектор;

3 – шахта стоек электрододержателей;

4 – механизм перемещения электродов; 5 – электрододержатель

Процессы рафинирования, в отличие от других процессов в РТП, проходят с открытой дугой, поэтому электрический режим рафинировочной печи близок к режиму ДСП. Рафинировочные печи, работающие на постоянном токе, целесообразно использовать для выплавки чистых металлов и сплавов, подверженных окислению на воздухе, например, для выплавки металлического хрома, марганца, никеля. Использование постоянного тока, как указывалось выше, позволяет поддерживать в печи неокислительную атмосферу, что снижает потери переплавляемого металла. Пример такой печи небольшого размера приведен на рис. 4.67.



**Рис. 4.67. Дуговая печь постоянного тока ДП-0,1  
разработки ООО «НПФ КОМТЕРМ»:**

- 1 – ванна; 2 – свод; 3 – механизм наклона; 4 – механизм перемещения электрода;  
 5 – электрододержатель; 6 – сводовый электрод  
 (графитированный или угольный); 7 – подовый электрод  
 (при выплавке стали подовый электрод состоит из сваренных  
 между собой медной водоохлаждаемой и стальной частей);  
 8 – механизм подъема и отворота свода; 9 – патрубок газоотсоса;  
 10 – механизм загрузки; 11 – зонт; 12 – шкаф управления; 13 – источник питания

#### 4.3.4. Плавка на блок (блок-процессы)

Указанные процессы используют для получения электрокорунда (алунда), ферровольфрама, карбида бора.

Температура плавления указанных тугоплавких материалов выше, чем температура плавления исходной шихты, поэтому они находятся в расплавленном состоянии лишь короткое время. На подине печи появляется лужа расплавленного материала, которая застывает снизу, сверху наплавляется новый материал. Постепенно лужа поднимается все выше, а под ней образуется блок застывшего материала. Блок, нарастая, постепенно занимает по высоте всю печь. Процесс плавки на блок – периодический: после окончания формирования блока электроды поднимают, ванну откатывают в сторону на тележке, после остывания из ванны удаляют блок, дробят его, а продукты дробления отправляют на дальнейшую обработку.

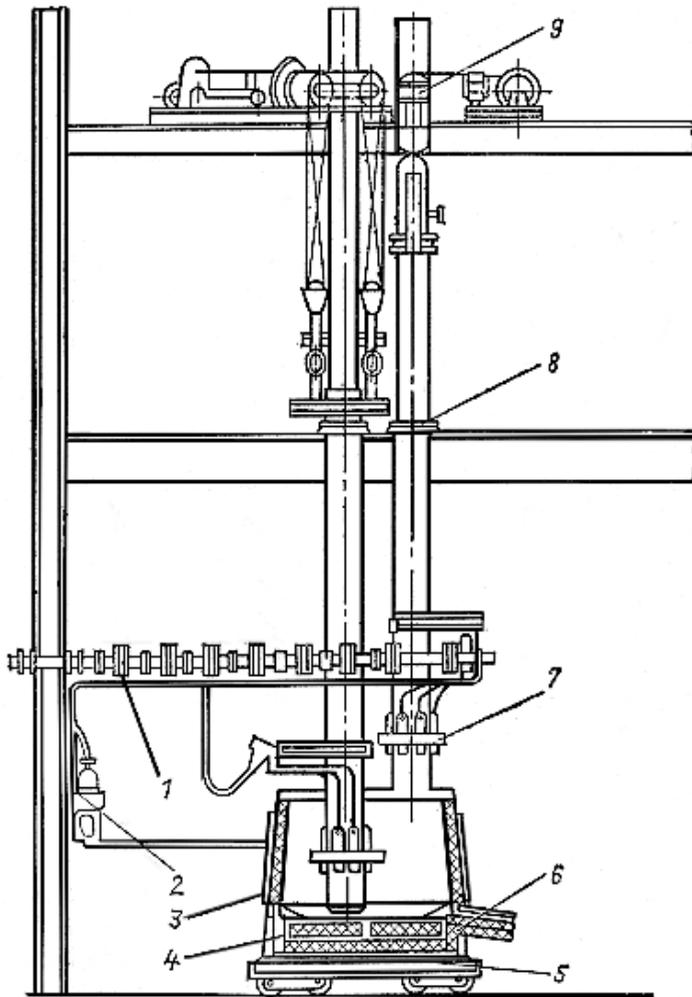
Футеруется только подина ванны печи (угольными блоками), стены печи представляют собой стальной водоохлаждаемый кожух, роль футеровки стен выполняет слой нерасплавившейся шихты (гарниссаж) между кожухом и блоком (рис. 4.68).

Говоря о конструкциях руднотермических печей, необходимо отметить, что в них, за исключением рафинировочных печей, как правило, используются *самоспекающиеся электроды*. Такой электрод представляет собой стальной цилиндрический кожух, сваренный из листа, заполненный электродной массой, состоящей из кокса, каменноугольной смолы и пека. Конец электрода, опущенный в ванну печи, постепенно обгорает, а его кожух расплавляется. По мере обгорания концов электродов привод опускает электроды вниз. При этом наполняющая кожух электрода масса попадает во все более горячую зону и спекается, превращаясь в твердый угольный электрод.

По мере уменьшения длины электрода к его верхней части (выше площадки наращивания электродов) приваривают новую секцию кожуха. Затем электрод перепускается, чтобы восстановить расстояние между электрододержателем и нижним концом электрода; механизм перепуска состоит из двух колец, внутри которых по окружности расположены 6–8 удерживающих щек, зажимающих электрод при помощи пружинно-гидравлических механизмов. При перепуске нижний зажим ослабляется, и электрод проскальзывает внутри электрододержателя на необходимое расстояние, после чего снова зажимается щечками механизма перепуска. Водоохлаждаемые щеки контактного узла, выполненные из меди, обеспечивают электрический контакт электрода с токоподводом.

Диаметр самоспекающихся электродов достигает 2 м, длина – 10–15 м, масса – 5 т.

Рафинировочные печи используют графитовые электроды и по конструкции аналогичны используемым электродам в ДСП.



**Рис. 4.68. Печь для выплавки корунда:**

- 1 – короткая сеть; 2 – система водоохлаждения; 3 – съемный кожух;  
 4 – кожух подины; 5 – тележка; 6 – футеровка подины; 7 – электрододержатель;  
 8 – уплотнение; 9 – лебедки перемещения электродов

К кожухам руднотермических печей предъявляются требования высокой прочности и герметичности, поэтому они выполняются цельносварными из стали толщиной до 32 мм. Некоторые участки кожуха (чаще всего в районе выпускных отверстий) могут выполняться водоохлаждаемыми. По конструкции уплотнения колошника, РТП бывают открытыми (с низким или высоким зонтом), закрытые (со сводом, в котором вокруг электродов выполнены воронки для загрузки шихты) и герметичные (со сводом, в котором вокруг электродов выполнены сальниковые уплотнения капсулированных контактных узлов электродов).

Печные газы из-под уплотнения колошника удаляются в систему газоочистки с помощью газоотводящих патрубков, а загрузка шихты выполняется с помощью труботечек.

#### **4.4. Установки вакуумного дугового переплава (ВДП)**

Требования к качеству конструкционных сталей и специальных сплавов постоянно повышаются. Очистка от мелких загрязнений, примесей, неметаллических включений (соединений серы и фосфора, оксидов и нитридов), растворенных в стали газов (азота, кислорода, водорода), формирование качественной кристаллической структуры позволяет значительно улучшить прочностные свойства сталей, их пластичность, ударную вязкость и другие свойства. Особенно высокие требования предъявляются к сталям, используемым в авиационной и космической промышленности, шарикоподшипниковым, жаропрочным лопаточным сталям (лопатки газовых турбин) и других специальных областях применения.

В современной металлургии широко используются методы дополнительного рафинирования стали, выплавленной в дуговых сталеплавильных печах. Для этого используются агрегаты ковш–печь (АКП) и вакууматоры, в которых возможно удалить из стали и избыточный углерод, снизить до тысячных долей процента вредные примеси и растворенные газы. Однако, в ряде случаев достигаемой при этом степени рафинирования недостаточно, поскольку в этих процессах жидкий металл контактирует с футеровкой, из которой неизбежно какое-то количество неметаллических включений и газов передается металлу. Сходная проблема возникает и при выплавке высокорреакционных сплавов в вакуумных индукционных печах (ВИП) с керамическим тиглем, даже при использовании высокочистых исходных материалов. Кроме того, после заливки жидкого металла или сплава в форму процессом кристаллизации очень сложно управлять, в результате чего кристаллическая структура слитка не удовлетворяет жестким современным требованиям.

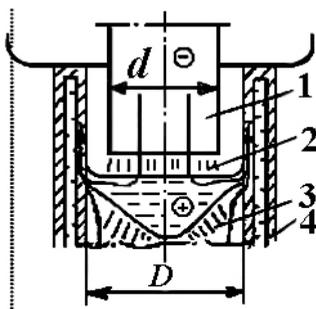
Принципиально, существует два пути решения данной проблемы. Один из них – это глубокая обработка деформацией (до восьмикратной) путем прессования иликовки. Высокая стоимость этого способа и невозможность изменить химический состав слитка ограничивают сферу применения этого способа.

Комплексное улучшение свойств заготовки: глубокое рафинирование и получение заданной кристаллической структуры, достигается ее переплавом расходных электродов в вакуумной дуговой и/или электрошлаковой печи методом последовательного непрерывного наплавления слитка.

Основными установками вторичного переплава сталей, являются вакуумные дуговые печи (ВДП) и печи электрошлакового переплава (ЭШП). В них получают металлы и сплавы с высокими свойствами, необходимыми для производства авиационной, космической, химической, атомной и других видов техники.

В ВДП выплавляют тугоплавкие и высокорреакционные металлы (титан, вольфрам, молибден, ниобий, цирконий и др.), а также стали и сплавы специального назначения (жаропрочные, коррозионностойкие, шарикоподшипниковые и др.).

Схема вакуумного дугового переплава показана на рис. 4. 69. Тепло от дуги передается расходуемому электроду, который оплавляется, образуя на торце пленку жидкого металла. Под действием силы тяжести и электродинамических усилий образуются капли, которые, отрываясь от электрода, падают на поверхность формируемой жидкой ванны.



**Рис. 4.69. Схема вакуумного дугового переплава:**  
1 – расходуемый электрод; 2 – дуга; 3 – формируемый слиток;  
4 – водоохлаждаемый кристаллизатор

По характеру использования ванны жидкого металла различают печи двух видов. В гарнисажных печах (литейных) тепло дуги обеспечивает получение достаточно больших объемов жидкого металла в специальных тиглях, из которых жидкий металл заливается в формы.

В печах для получения слитков формообразующими элементами являются водоохлаждаемые кристаллизатор и поддон. Во время плавки одновременно наплавляется ванна жидкого металла и происходит его затвердевание в условиях усиленного теплоотвода к водоохлаждаемым стенкам кристаллизатора. Это позволяет создать условия для формирования слитка заданной структуры без дефектов усадочного характера. Рассмотрим печи данного вида как наиболее распространенные.

По высоте кристаллизатора распределение теплового потока не равномерно. Можно выделить три характерные зоны [29].

1. Зона излучения, расположенная выше зеркала жидкометаллической ванны. Тепловая нагрузка в этой зоне, определяемая излучением с поверхности ванны, боковой поверхности электрода и от столба дуги достигает  $0,3 \dots 0,7 \text{ МВт/м}^2$ .

2. Зона контакта слитка со стенкой кристаллизатора, в которой поток тепла определяется теплопроводностью в радиальном направлении от жидкого металла к медной стенке кристаллизатора и достигает  $0,7 \dots 0,8 \text{ МВт/м}^2$ .

3. Зона ниже пояса прямого контакта слитка с кристаллизатором. Здесь тепловой поток передается излучением и не превышает  $0,8 \text{ МВт/м}^2$ .

Тепловая нагрузка в поддоне вначале плавки достигает  $1,5 \text{ МВт/м}^2$  и, затем, быстро снижается.

Дуга в ВДП горит в атмосфере паров переплавляемого металла. Для разных металлов требуется поддержание различных значений давления в вакуумной камере: от 1 до  $10^2$  Па. Из-за испарения металла под действием дуги давление в разрядном промежутке обычно на пол порядка выше, чем давление в вакуумной камере.

В большинстве случаев в ВДП используют постоянный ток прямой полярности, когда катодом служит расходимый электрод. Электромагнитное взаимодействие вертикальной составляющей тока дуги и радиальной составляющей тока, стекающего с жидкой ванны на кристаллизатор в зоне их контакта, приводит к вращению жидкометаллической ванны. Вращение ванны при выплавке некоторых сплавов приводит к дефекту структуры слитка, называемому «пятнистой ликвацией». Для исключения таких дефектов вокруг кристаллизатора размещают соленоид, через который пропускают знакопеременный ток. Частоту реверса тока подбирают так, чтобы подавить вращение ванны металла. Водоохлаждаемую рубашку кристаллизатора при этом необходимо выполнить из немагнитной стали.

При наличии несимметрии магнитного поля токоподвода относительно оси печи или из-за расположения вблизи зоны разряда несимметричных токоведущих элементов конструкции магнитных масс наблюдается эффект магнитного дутья, в результате которого дуга смещается от оси симметрии и электрод оплавляется преимущественно с одной стороны. Это приводит к несимметрии кристаллической структуры слитка, что недопустимо. Поэтому при проектировании и эксплуатации ВДП особое внимание следует уделять симметрии токораспределения и магнитного поля токоподвода.

Конструктивную и электрическую схему ВДП наглядно иллюстрирует мнемосхема процесса плавки, представленная на рис. 4.70. Плавка в ВДП делится на период вспомогательных операций и на горячий период, когда печь находится под током.

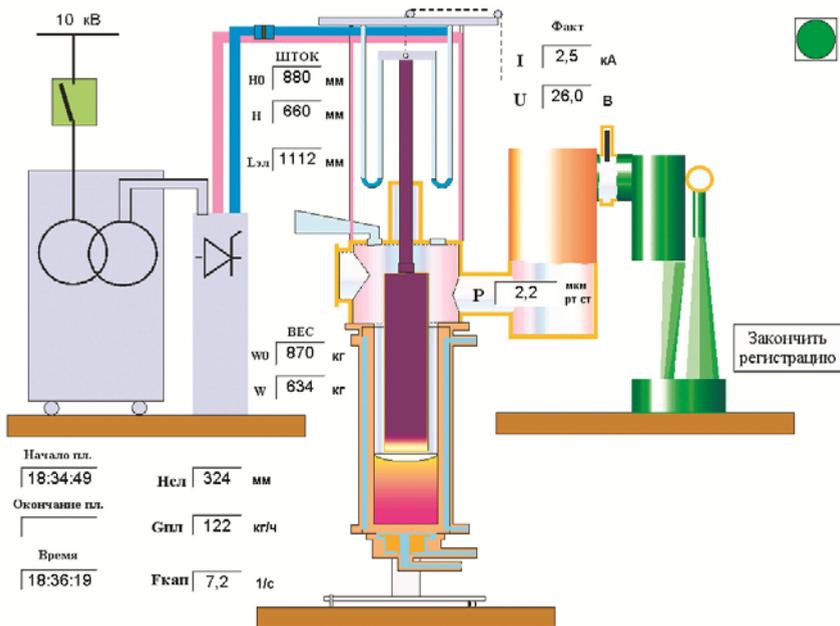


Рис. 4.70. Схема ВДП на примере мнемосхемы печи (проект фирмы «КОМТЕРМ»)

В начале горячего периода плавки производят зажигание дуги. Для этого опускают электрод до короткого замыкания с затравкой, которую кладут на поддон, или до пробоя разрядного промежутка, после чего электрод устанавливают на высоте, соответствующей заданной длине дуги. Горячий период подразделяется на три подпериода: прогрев электрода, период переплава и вывод усадочной раковины. При прогреве электрода его плавления не происходит, и все выделяющееся тепло идет на повышение теплосодержания электрода. Поэтому обычно работают на пониженных значениях тока для предотвращения прожога поддона. После прогрева электрода и появления на его торце пленки жидкого металла ток резко повышают (рис. 4.71) и начинают непосредственно переплавление металла.

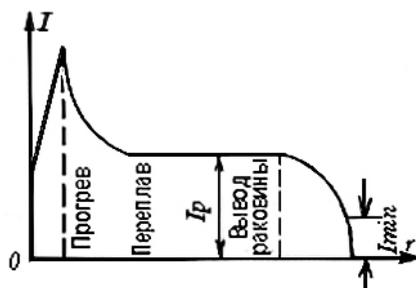


Рис. 4.71. График изменения тока в ходе плавки в ВДП

Переplав металла является основным технологическим периодом печи. Режим переplава выбирают таким образом, чтобы обеспечить требуемое качество слитка, которое связано, прежде всего, со скоростью плавки, являющейся основным параметром вакуумного дугового переplава. Массовая скорость плавки зависит от физических свойств переplавляемого металла, электрического режима и диаметра кристаллизатора.

В начале периода переplава тепловые условия изменяются по мере продолжения прогрева электрода и формирования жидкой ванны металла. На этом интервале режим переplава нестационарный и ток снижают по экспоненциальному закону, как оказано на рис. 4.71. После стабилизации теплового режима поддерживают ток неизменным до начала выведения усадочной раковины.

В конце плавки для снижения размеров усадочной раковины и повышения выхода годного металла за счет снижения обреза головной части слитка, проводят снижение тока до минимального значения, при котором прекращается плавление.

При разработке и эксплуатации печи важно учитывать особенности горения дуги в ВДП, в частности электрические (рис. 4.72 а) и регулировочные (рис. 4.72 б) характеристики печи. На этом рисунке приведены характеристики при трех значениях тока ( $I_1 > I_2 > I_3$ ) и трех значениях длины дуги ( $l_{д1} > l_{д2} > l_{д3}$ ). Важно отметить немонотонность характеристик, что накладывает особые требования на систему управления печи.

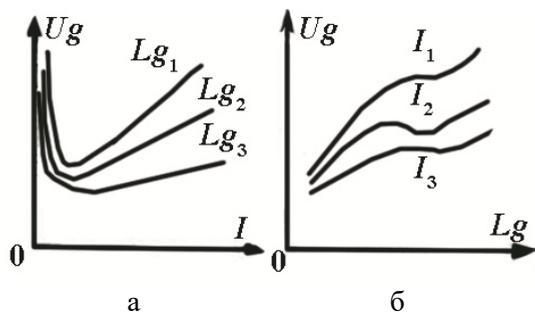
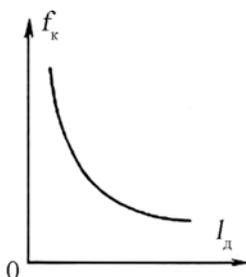


Рис. 4.72. Зависимость напряжения дуги от а – тока и б – длины в ВДП

С ростом длины дуги повышается ее мощность и производительность плавки. Но при увеличении длины дуги сверх ширины зазора между электродом и кристаллизатором дуга может переброситься на стенку кристаллизатора, что может привести к его прожогу и аварии. Такая же ситуация может возникнуть и при повышении концентрации ионов в боковой зоне электрода. Чтобы обеспечить устойчивое горение дуги на металлическую ванну при требуемой длине дуги (обычно 15–30 мм) используют магнитное поле, создаваемое соленоидом, расположенным соосно кристаллизатору. Это особенно важно при выплавке высокорекреакционных и тугоплавких металлов и сплавов.

Соленоид должен быть рассчитан на создание напряженности 300 Э магнитного поля по высоте наплавляемого слитка (с. 211 [30]). Источник питания соленоида должен обеспечивать реверс полярности тока с периодом до 40с. Стабилизация положения сильноточного разряда постоянного тока в вакууме достигается при напряженности магнитного поля около 4000–4800 А/м (с возможностью его резкого увеличения до 8000 А/м при перебросе дуги на стенку кристаллизатора)[29], силовые линии которого параллельны направлению движения заряженных частиц в столбе, т.е. аксиального поля. Кроме стабилизации разряда и уменьшения тем самым вероятности переброса его на стенку кристаллизатора (изложницы) аксиальное магнитное поле уменьшает или полностью ликвидирует ток утечки, увеличивая долю анодной мощности, выделяющуюся на зеркале ванны, способствуя повышению температуры расплава.

Следует отметить важную особенность электромагнитных процессов при формировании и падении капель металла в ВДП. Капля по своим размерам занимает значительную часть разрядного промежутка. Поэтому дуга замыкается через каплю металла, длина дуги и напряжение на дуге при пролете капли резко снижаются, образуя так называемые «капельные» импульсы в кривой напряжения на электроде. По изменению частоты этих импульсов  $f_k$  можно судить об изменении скорости переплава, на которую влияет длина  $l_d$  разрядного промежутка в печи, как показывает график, приведенный на рис. 4.73. Соответственно, вводя коррекцию в режим плавки с учетом частоты капельных импульсов можно компенсировать неоднозначность регулировочной характеристики печи, приведенную на рис. 4.72, б.



**Рис. 4.73. Зависимость частоты капельных импульсов от длины разрядного промежутка**

На рисунке 4.74 представлено фото вакуумной дуговой печи производства фирмы «КОМТЕРМ», предназначенной для выплавки композитных слитков диаметром до 250 мм из ниобия и меди (слева) и выплавленный слиток (справа). Печь выполнена в виде единого компактного модуля, объединяющего все оборудование установки: вакуумную камеру, механизмы, вакуумные насосы, источник питания и систему автоматического управления. В головной части слитка видна

так называемая «корона», которая образуется в результате конденсации паров переплавляемых металлов на водоохлаждаемой стенке кристаллизатора при вакуумном дуговом переплаве.



**Рис. 4.74. Вакуумная дуговая печь фирмы «КОМТЕРМ» и выплавленный в ней композитный слиток диаметром 250 мм**

#### **4.5. Установки электрошлакового переплава (ЭШП)**

Последние десятилетия отмечены существенным повышением требований к качеству конструкционных сталей. Становятся все более жесткими требования по снижению себестоимости производства.

Лучшие сорта стали получают в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), в которых на стадии рафинирования возможно практически полностью удалить из стали в шлак вредные примеси, такие, как сера, фосфор, избыточный углерод, оксиды железа. Однако полностью удалить ряд неметаллических примесей и растворенные в стали газы в процессе рафинирования стали в ДСП не удается. Для того чтобы добиться особой чистоты стали, необходимо еще один или даже несколько раз ее переплавить и провести рафинирование в новых условиях, существенно отличающихся от условий, в которых происходит рафинирование стали в ДСП.

Для решения названных задач наряду с ВДП широко используется электрошлаковый переплав, стоимость которого ниже, а технологические возможности шире. В отличие от ВДП, установки ЭШП не требуют создания вакуума, конструктивно они несколько проще, чем ВДП, и безопаснее в эксплуатации.

Первая в мире экспериментальная установка ЭШП была запущена в 1958 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона Академии наук Украинской ССР. В начале-середине 60-х гг. XX в. электрошлаковый переплав начал входить в

промышленную практику. Руководил работами по созданию установок и технологии электрошлакового переплава выдающийся ученый академик Б.Е. Патон, значительный вклад в развитие электрошлакового переплава внесли также академик Б.И. Медовар, профессора Л.А. Волохонский, Ю.М. Миронов и другие. В настоящее время установки ЭШП широко распространены как в России и странах бывшего СССР, так и во всех промышленно развитых государствах.

Установки электрошлакового переплава используются для получения металлических слитков, прежде всего, слитков высококачественных сталей и сплавов круглого, прямоугольного и кольцевого сечений. Нагрев и плавление переплавляемого материала (расходуемого электрода) в установках ЭШП осуществляются за счет джоулева тепла, выделяемого при протекании тока по слою расплавленного шлака, в который погружается конец электрода (рис. 4.75).

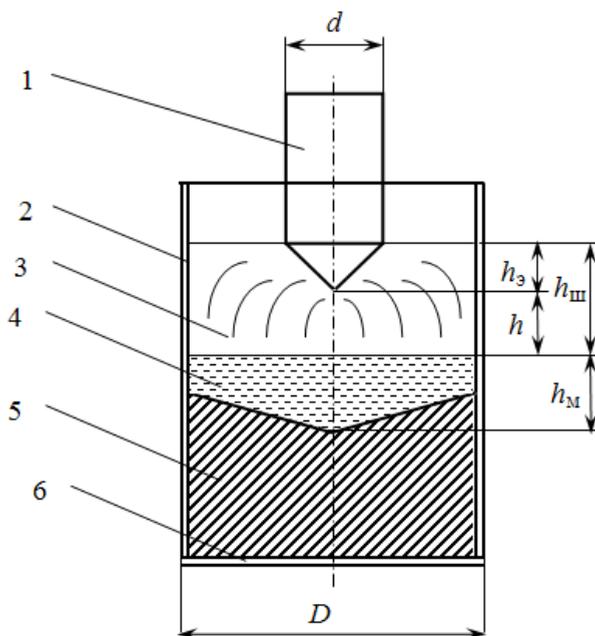


Рис. 4.75. Принципиальная схема электрошлакового переплава

Введенный в шлаковую ванну 3 конец расходуемого электрода 1 оплавляется, металл в виде капель проходит через слой шлака 3, очищаясь при этом, и скапливается в водоохлаждаемом кристаллизаторе (обычно медном) 2 с водоохлаждаемым поддоном 6, образуя ванну жидкого металла 4, которая, затвердевая, образует слиток 5. В жидкометаллическую ванну могут вводиться легирующие добавки в виде проволоки или в иной форме с использованием специального дозатора. Поскольку площадь поперечного сечения слитка больше, чем сечение электрода, длина электрода в процессе плавки сокращается быстрее,

чем нарастает длина слитка. Вследствие этого увеличивается межэлектродное расстояние, т.е. расстояние между концом электрода и ванной жидкого металла ( $h$  на рис. 4.75), что ухудшает качество процесса и в пределе может привести к выходу конца электрода из шлаковой ванны, т.е. к разрыву электрической цепи. Для компенсации такого изменения межэлектродного расстояния электрод необходимо перемещать вниз, для чего используется регулируемый электропривод, перемещающий каретку с электрододержателем.

**Расходуемый электрод** круглого, как правило, сечения изготавливают литьем, прокаткой или ковкой из полученной в ДСП стали.

Отметим, что расходуемый электрод плавится, прежде всего, за счет тепла, выделяющегося в шлаковой ванне, а не в самом электроде. Наибольшее тепловыделение имеет место в шлаковой ванне, поскольку ее активное сопротивление существенно выше, чем у других последовательно соединенных участков электрического контура: токоподвод – расходуемый электрод – шлаковая ванна – жидкометаллическая ванна – поддон. Теплопередача от шлака электроду осуществляется конвекцией и излучением.

Качество металла, получаемого при электрошлаковом переплаве, высоко. Чистота металла обеспечивается исключением взаимодействия расплавленного металла с атмосферой (слой шлака надежно защищает жидкий металл от контакта с кислородом воздуха) и керамической футеровки, которая в установках ЭШП отсутствует, а также обработкой металла шлаком при высокой температуре. Кроме того, получается слиток плотной и равномерной структуры благодаря неизменности во времени скорости кристаллизации и конфигурации фронта кристаллизации. Большая плотность и качество слитков, получаемых в установках ЭШП, позволяют изготавливать крупные (до 300 т) ответственные отливки, например, для валов мощных паровых турбин и генераторов, гребных валов судов.

В установках ЭШП может использоваться как стационарная, так и подвижная оснастка (кристаллизатор, поддон). В последнем случае для вертикального перемещения оснастки используется вторая каретка с управляемым электроприводом.

Процессу переплава металла предшествует стадия наведения шлаковой ванны. Существуют два способа наведения шлаковой ванны – «жидкий» и «твердый» старты. При жидком старте в кристаллизатор установки ЭШП заливается жидкий шлак, приготовленный в специальной флюсоплавильной печи, основным источником тепла в которой служит резистивный нагрев шлака, по которому протекает электрический ток. Электрическая дуга используется только вначале плавки. После наплавления небольшого количества шлака в флюсоплавильной печи электроды в него погружаются, и плавка переходит в бездуговой режим.

При твердом старте в ЭШП шлак расплавляется непосредственно в кристаллизаторе при протекании тока через расходующий электрод, шлакообразующие материалы и поддон, при этом используются запальные смеси, при сгорании которых выделяется большое количество тепла. В процессе расплавления шлака при твердом старте возникают дуговые разряды, под действием которых происходит расплавления небольшого количества шлака, шунтирующего дуговой промежуток. Процесс наплавления шлака переходит в резистивный режим. По мере перегрева жидкого шлака происходит нагрев электрода (как вследствие джоулева нагрева самого электрода, так и теплопередачей от расплавленного шлака), что приводит к началу оплавления расходующего электрода. В начале наплавления металлической ванны в нижней ее части жидкий металл смешивается с остатками нерасплавленного шлака, и отдавая ему тепло, застывает. Вследствие этого при твердом старте в нижней части слитка присутствуют включения нерасплавившегося шлака. По мере прогрева электрода, шлаковой и металлической ванн, плавка выходит на установившийся режим.

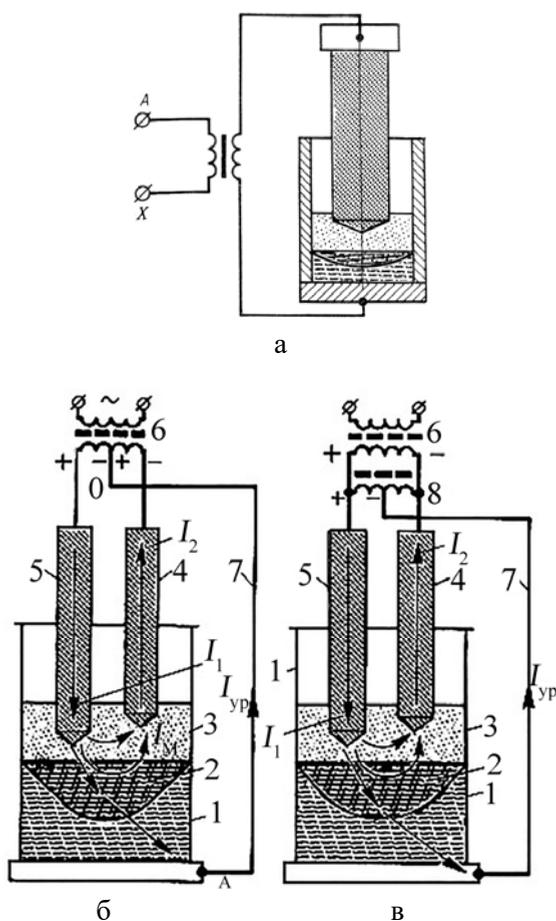
Шлаки, используемые при ЭШП, представляют собой смесь  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  в разных пропорциях. Наиболее часто используются шлаки марок АНФ-6 (60%  $\text{CaF}_2$ , 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), АНФ-28 (30%  $\text{CaF}_2$ , 25 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 25%  $\text{CaO}$ , 20 %  $\text{SiO}_2$ ).

Стадия переплава металла характеризуется спокойным электрическим режимом, что обусловлено малыми колебаниями тока и отсутствием дуги при правильном выборе количества шлака и заглужения электрода в шлак. Следует помнить, что дуговой режим для установки ЭШП на стадии переплава является недопустимым.

Установки ЭШП, как правило, питаются переменным током промышленной частоты через понижающие трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения под нагрузкой. Установки бывают одноэлектродными и многоэлектродными (от 2 до 6 электродов), в зависимости от числа электродов используются одно-, двух-, трех- и шестифазные схемы питания [31]. Одной из наиболее распространенных является однофазная монофилярная схема, при которой ток протекает по контуру: источник – расходующий электрод – шлаковая ванна – жидкометаллическая ванна – слиток – поддон (рис. 4.76 а). При этом прямой и обратный провода токоподвода образуют большую петлю, поэтому индуктивность токоподвода велика, и коэффициент мощности установки с монофилярной схемой составляет всего 0,6–0,8, а у крупных установок (массой слитка более 40 т) он еще ниже.

Коэффициент мощности существенно выше (до 0,9) у установок с двумя электродами (или двумя группами электродов) бифилярной схемой их включения (рис. 4.76 б, в). Для снижения индуктивности контура прямой и обратный токоподводы прокладываются рядом. Электроды 4 и 5 со встречно направленными

ми токами также расположены в непосредственной близости друг от друга. В результате индуктивность печного контура резко снижается. Для обеспечения выравнивания мощности между электродами и их положения в шлаковой ванне, снижения вероятности пробоя на стенку кристаллизатора поддон соединяют с нулевой точкой источника питания уравнивающим токоподводом (7). Если у трансформатора (6) имеется вывод нулевой точки (средней точки вторичной обмотки), то он соединяется с поддоном. Если отсутствует такая возможность, то используют включение дросселя (8), имеющего вывод средней точки обмотки. Сравнительно высоким значением коэффициента мощности отличаются также трехфазные установки ЭШП с одним кристаллизатором и тремя электродами, расположенными по вершинам равностороннего треугольника.



**Рис. 4.76. Схемы установок ЭШП:**

монофиларная – а, бифиларные – мостовая – б и с уравнительным дросселем – в.

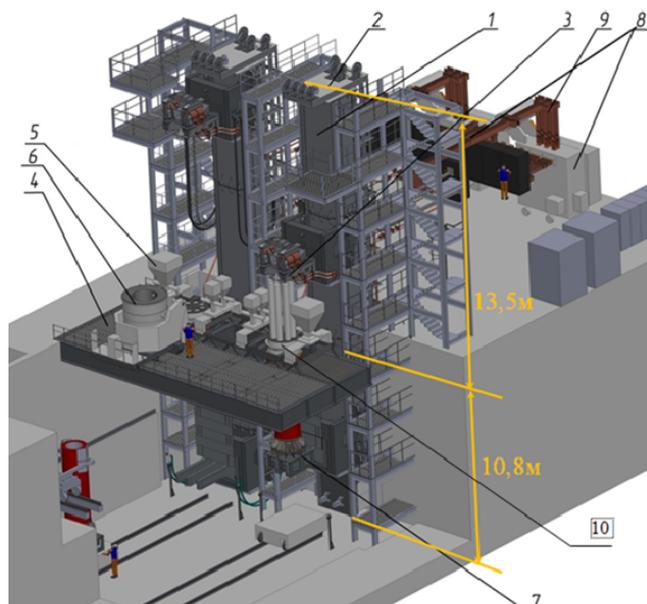
1 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 2 – металлическая ванна;

3 – шлаковая ванна; 4, 5 – расходуемые электроды; 6 – печной трансформатор;

7 – уравнительный токоподвод; 8 – дроссель

Для крупных печей бифилярная схема также как и монофилярная не обеспечивает приемлемое значение коэффициента мощности. Кроме того, мощная однофазная нагрузка крайне нежелательна, так как создает значительный перекося напряжения по фазам питающей сети и снижает экономические показатели. Постоянный ток для питания установок ЭШП не применяется, поскольку вызывает электролиз шлака с выделением фтора, являющегося сильнодействующим отравляющим веществом, а также приводит к быстрой эрозии медного кристаллизатора.

Указанные энергетические проблемы снимаются при использовании питания установок ЭШП током низкой (до 5 Гц) частоты от преобразователя частоты. Соответствующие схемы питания ЭШП рассмотрены ниже в разделе 4.5. На рисунке 4.77 приведена конструктивная схема установки ЭШП-15/30, рассчитанной на выплавку слитков и трубных заготовок диаметром до 2000 мм массой до 120 т, выполненной по совместному проекту фирмы «КОМТЕРМ» и института «ЦНИИТМАШ». На рисунке 4.78 представлены фото общего вида этой печи (слева) и процесса выплавки на ней трубной заготовки (справа). Установка выполнена из двух печей, которые могут работать автономно или объединяться в единый агрегат для выплавки наиболее крупных заготовок.



**Рис. 4.77. Конструктивная схема ЭШП 15/30,**

**с тиристорным источником питания током 75 кА частотой 0,1–5 Гц:**

- 1 – колонна; 2 – платформа верхняя; 3 – каретка верхняя с электрододержателем и тензодатчиками;
- 4 – платформа главная; 5 – бункеры системы дозирования сыпучих;
- 6 – кантователь с тиглем-ковшом; 7 – каретка нижняя перемещения поддона;
- 8 – источники питания током пониженной частоты 0,1–10 Гц; 9 – короткая сеть;
- 10 – короткий кристаллизатор с датчиком границы шлак-металл



а

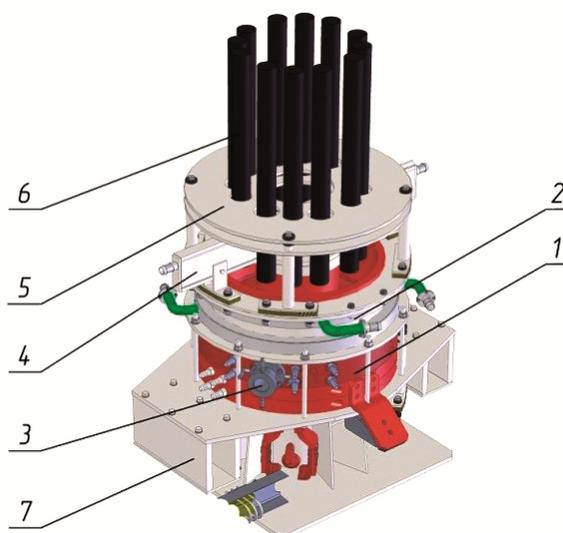


б

**Рис. 4.78. ЭШП 15/30 для выплавки слитков массой до 120 тонн – а, выплавка трубной заготовок диаметром 550 мм длиной до 10 м – б**

Мощность крупных установок ЭШП достигает 20 000 кВА, а так как напряжение невелико (не более 150 В), ток печного контура значителен и может составлять 100 кА и более. Поскольку тепловые потери в водоохлаждаемом кристаллизаторе велики, КПД установок ЭШП низок, а удельный расход электроэнергии достигает 1200–2000 кВт·ч/т.

Трубная заготовка выплавляется в кристаллизаторе специальной конструкции (получившей название «беличье колесо»), показанной на рис. 4.79. Конструкция состоит из наружного медного кристаллизатора (1) (с системой водяного охлаждения (2), в котором смонтирован датчик (3) уровня металлической ванны. Формирование трубы происходит в кольцевом зазоре между наружным кристаллизатором и медным водоохлаждаемым дорном (внутренним кристаллизатором), который закреплен с помощью траверсы (4). Через кондуктор (5), пропущены расходомерные электроды (6), расположенные по кольцу. Снизу в кольцевом зазоре между наружным кристаллизатором и дорном установлен водоохлаждаемый поддон кольцевой формы, который закреплен на основании (7). Поддон во время плавки неподвижен и удерживает формируемую трубную заготовку с помощью закрепленных на нем затравок. Кристаллизатор с дорном перемещаются вверх, формируя трубную заготовку. Электроды по мере оплавления опускаются вниз. Система управления обеспечивает синхронизацию встречных перемещений кристаллизатора и электродов, а также управляет электрическим режимом плавки.

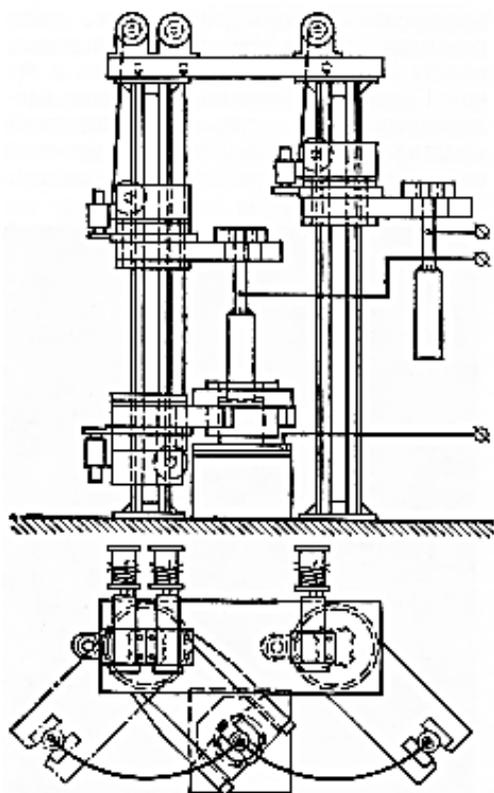


**Рис. 4.79. Кристаллизатор для выплавки грубой заготовки**

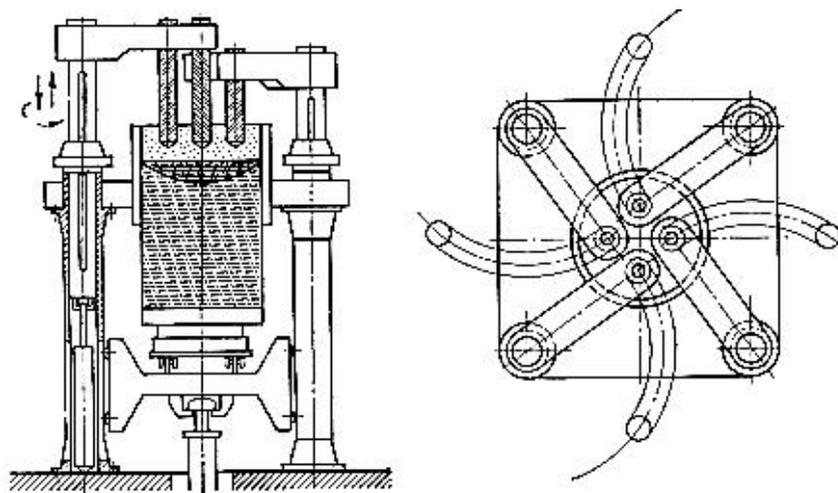
Использование тока пониженной частоты не только обеспечивает высокие энергетические показатели, но и позволяет получить уникальное качество выплавляемых заготовок по кристаллической структуре, неметаллическим включениям, механическим характеристикам металла. Полученные на печи ЭШП-15/30 заготовки отвечают самым высоким требованиям, предъявляемым к изделиям ответственного назначения без дополнительной обработки деформацией.

Как видно из рис. 4.77, 4.78 установки ЭШП имеют большую высоту. Это связано с тем, что при коэффициенте заполнения кристаллизатора порядка 0,7 (отношение площади поперечного сечения электродов к площади сечения кристаллизатора) длина расходуемых электродов и, соответственно, высота печи примерно в 1,4 и 3 раза превышают длину выплавляемой заготовки. Это приводит к значительному удорожанию крупных установок ЭШП, предназначенных для получения длинномерных заготовок, а также цеха для их размещения. Для сокращения высоты печи ЭШП выполняют с возможностью замены электрода в процессе плавки.

На рисунке 4.80 представлены конструктивные схемы, позволяющие быстро заменять расходуемые электроды. При использовании таких схем высота установки ЭШП значительно сокращается, но возникают заметные колебания и перерывы в графике вводимой мощности, что оказывает влияние на изменение кристаллической структуры слитка.



а



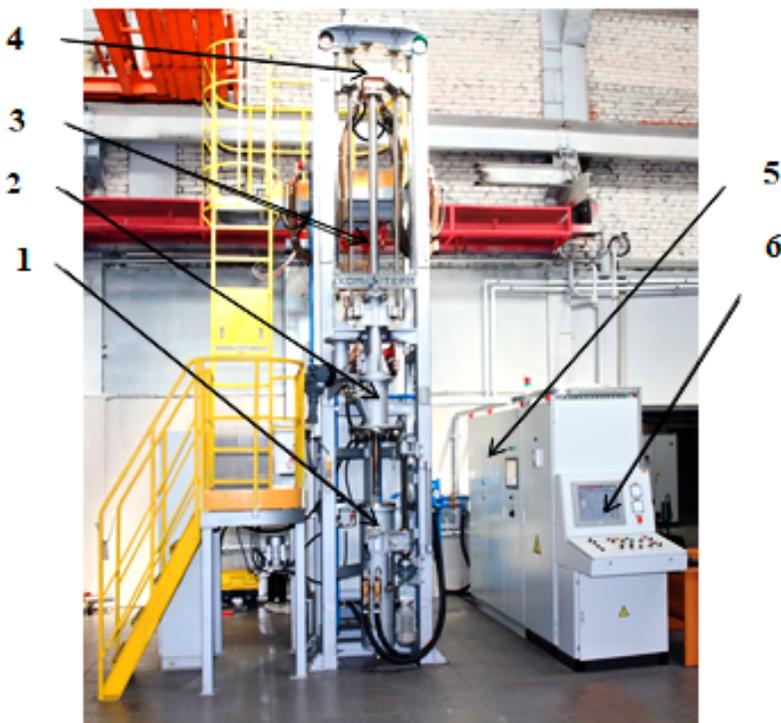
б

Рис. 4.80. Конструктивные схемы ЭСП со сменными электродами:  
а) одноэлектродной, б) четырехэлектродной

Так что за удешевление установки приходится расплачиваться ухудшением качества получаемого слитка. Для получения трубной заготовки данный способ не применяется из-за недостаточной тепловой инерционности ванны, охлаждаемой с двух сторон – изнутри заготовки и снаружи.

Электрошлаковый переплав под давлением позволяет получить уникальные свойства по коррозионной стойкости стали, заменяя никель азотом, при обеспечении его сверхравновесной концентрации. На рисунке 4.81 представлено фото электрошлаковой печи, обеспечивающей электрошлаковый переплав под давлением до 30 бар.

Существует множество самых разнообразных приложений технологии электрошлаковой плавки. Такие как кокильное и центробежное литье, получение сплошных и полых отливок самой разнообразной формы, электрошлаковая сварка и приплавление, позволяющее получать такие сложные по форме детали, как коленчатые валы судовых двигателей массой до сотен тонн, получение биметаллических листов и труб, электрошлаковая наплавка, переработка различных техногенных отходов, плавка в инертной атмосфере и многое другое.



**Рис. 4.81. Печь электрошлакового переплава под давлением ДЭШП-0,1 производства фирмы «КОМТЕРМ»**

#### 4.6. Дуговые и электрошлаковые печи как потребители электроэнергии и регулирование их режима

При разработке конструкции крупных электропечей особое внимание уделяется обеспечению высоких энергетических характеристик, так как от них зависят стоимость, производительность и затраты на их эксплуатацию. При работе дуговых и электрошлаковых печей в соответствии с особенностями технологических процессов требуется глубокое регулирование их электрического режима. В связи с этим предъявляются особые требования к схемам их питания, так как регулирование электрического режима, как правило, приводит к снижению энергетических характеристик. Кроме того, при работе дуговых и несимметричных нагрузок ухудшаются показатели качества электроэнергии в питающей сети, из-за чего приходится использовать дополнительное дорогое электрооборудование, обеспечивающее компенсацию неактивных составляющих мощности, потребляемой печами. Регулирование электрического режима приводит к дополнительному снижению показателей качества потребляемой электроэнергии.

Ниже рассмотрены основные показатели качества электроэнергии и энергетические показатели, а также их связь с параметрами печей и требованиями к регулированию их режима.

На рисунке 4.82 показаны возможные варианты регулирования тока и мощности дугового разряда. Возможные нагрузочные характеристики источника питания показаны наклонными прямыми линиями. На рисунке 4.82а регулирование выходного напряжения источника питания соответствует, например, переключению ступеней напряжения питающего трансформатора. На рисунке 4.82б регулирование выходного напряжения источника питания соответствует изменению балластного сопротивления, включенному в цепь нагрузки. Большим углом наклона соответствуют большие значения балластного сопротивления. На крайнем справа рисунке (рис. 4.82в) регулирование производится путем изменения длины дуги, при котором статическая ВАХ параллельно смещается. Чем длиннее дуга, тем выше расположена статическая ВАХ.

При работе дуговой нагрузки для обеспечения устойчивого горения дуги необходимо, чтобы в точке пересечения нагрузочной характеристики источника питания и статической ВАХ дуги разность между углами наклона ВАХ и нагрузочной характеристики была положительной и чем больше эта разность, тем более устойчив режим. В этом случае при случайном увеличении тока напряжение источника питания будет ниже значения, требуемого в соответствии с ВАХ и ток снизится. При случайном снижении тока напряжение источника будет избыточным и ток повысится. Соответствующие устойчивым режимам точки на рисунках показаны кружочками. В других точках пересечения характеристик дуга будет неустойчива.

Вариант регулирования дуги, показанный на рис. 4.82 б энергетически невыгоден, так как требует установки балластного сопротивления, которое будет потреблять значительную мощность. Способы регулирования, показанные на крайних рисунках, используются как по отдельности, так и совместно. При этом следует учитывать, что регулирование длины дуги приводит к изменению сопротивления нагрузки.

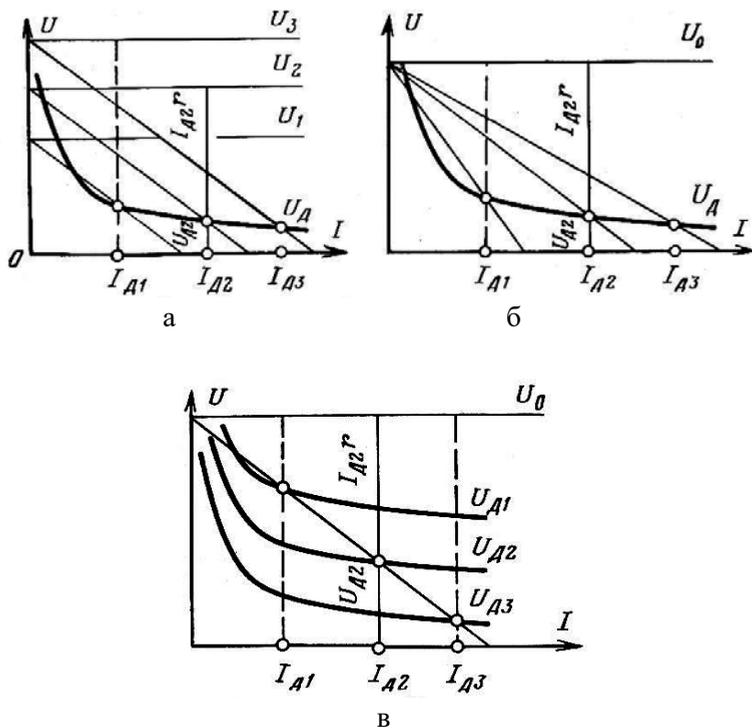


Рис. 4.82. Варианты регулирования тока дугового разряда

Анализ работы печи при регулировании сопротивления дуговой нагрузки проще выполнить в допущении, что дуга является линейным сопротивлением, ток и напряжение дуги синусоидальны. Рассмотрим *круговую диаграмму* электрической цепи, показанной на рис. 4.83. *Ток короткого замыкания* определяется выражением

$$I_{2К} = \frac{U_{2\Phi}}{\sqrt{r^2 + x^2}}, \quad (4.65)$$

где:  $r$  – активное сопротивление цепи питания, включая короткую сеть,  $\omega L$  – суммарное индуктивное сопротивление печного контура.

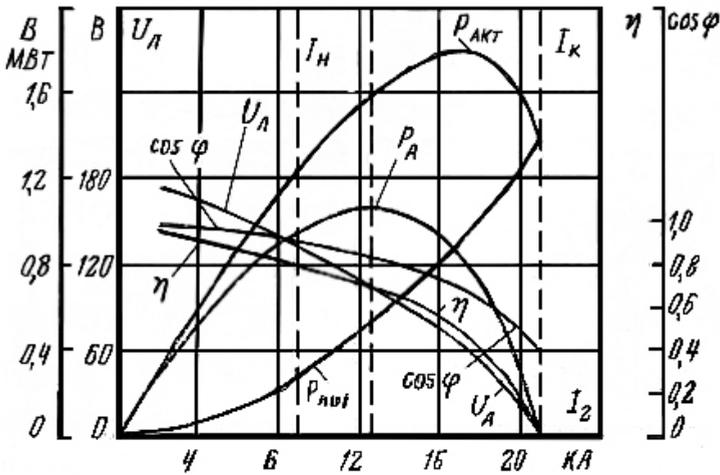
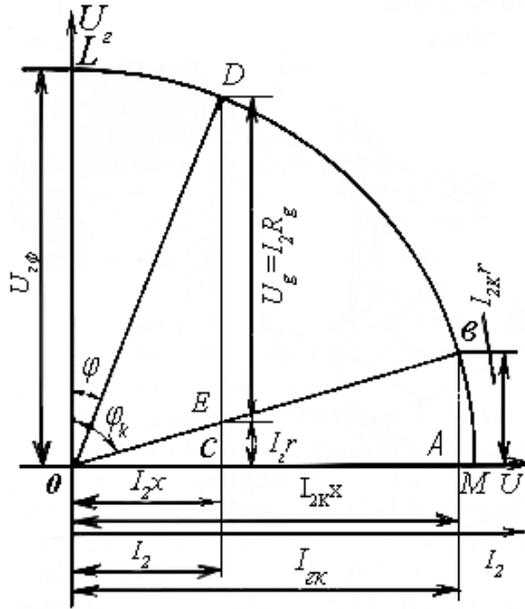


Рис. 4.83. Круговая диаграмм одной фазы дуговой печи, ее электрические характеристики

На круговой диаграмме в треугольнике  $OAB$  сторона  $OA$  соответствует индуктивному падению напряжения  $I_{2\kappa x}$ ,  $AB$  – активному падению напряжения  $I_{2\kappa r}$ ,  $OB$  – напряжению сети  $U_{2\phi}$ ,  $\phi_{\kappa}$  – сдвигу фаз тока и напряжения печи при коротком замыкании. Вершина вектора  $OB$ , соответствующая геометрической сумме активных и индуктивных падений напряжения, во всех режимах лежит на окружности, проведенной радиусом  $OB$  из начала координат  $O$ .

С учетом допущения о постоянстве индуктивного сопротивления падение напряжения в нем  $I_2x$ , пропорционально вторичному току  $I_2$ , по оси абсцисс можно отложить непосредственно значение тока в масштабе  $OA/I_{2к}$  (А/мм). Далее для произвольного значения тока  $I_2=OC$  восстановить из  $C$  перпендикуляр к оси абсцисс до пересечения в точке  $D$  с окружностью  $LM$ . Отрезок  $EC$  дает падение напряжения на сопротивлении  $r$ , равное  $I_2r$ , отрезок  $OC$  – падение напряжения на индуктивном сопротивлении  $x$ , равное  $I_2x$ , отрезок  $DE$  – напряжение на дуге  $U_d = I_2R_d$ , а угол  $\varphi$  – сдвиг фаз тока  $I_2$  и  $U_{2ф}$ . Построенная круговая диаграмма дает связь тока печи  $I_2$  и напряжения дуги  $U_d$ , а следовательно, и с сопротивлением дуги.

Показанные на рис. 4.83 электрические характеристики дуговой печи с трансформатором мощностью 2250 кВА построены в соответствии с приведенной круговой диаграммой и соотношениями:

$$P_{\text{пот}} = 3I_2^2r; \quad (4.66)$$

$$P_d = 3I_2U_d = 3I_2^2R_d = 3\left[I_2\sqrt{U_{2ф}^2 - (I_2x)^2} - I_2^2r\right]; \quad (4.67)$$

$$P_{\text{акт}} = P_d + P_{\text{пот}} = 3I_2^2(R_d + r) = 3I_2\sqrt{U_{2ф}^2 - (I_2x)^2}; \quad (4.68)$$

$$\eta_{\text{эл}} = P_d / P_{\text{акт}} = R_d / (R_{\text{акт}} + r) = U_d / [I_2(R_d + r)]; \quad (4.69)$$

$$S = 3I_2U_{2ф}; \quad (4.70)$$

$$\cos\varphi = P_{\text{акт}} / S = I_2(R_d + r) / U_{2ф}; \quad (4.71)$$

$$U_d = \sqrt{U_{2ф}^2 - (I_2x)^2} - I_2r; \quad (4.72)$$

$$R_d = U_d / I_2, \quad (4.73)$$

где  $P_{\text{пот}}$  – электрические потери, Вт;

$R_d$  – мощность, выделяющаяся в дуге, Вт;

$P_{\text{акт}}$  – активная мощность установки, Вт;

$S$  – кажущаяся мощность установки, В·А;

$\eta_{\text{эл}}$  – электрический к.п.д. установки.

Из приведенных на рис. 4.83 электрических характеристик видно, что с увеличением тока электрический к.п.д. печи и коэффициент мощности уменьшаются, электрические потери растут пропорционально квадрату тока, активная мощность печи и мощность дуг сначала растут, а затем, пройдя максимум, начинают уменьшаться. Поэтому увеличивать ток печи имеет смысл только до предела, соответствующего максимуму мощности дуг (в данном случае до 12,7 кА).

Максимум активной мощности достигается при равенстве активной и реактивной мощностей, когда  $\cos \varphi = 0,707$ . При этом соответствующий ток  $I_2' = U_{2\phi} / \sqrt{2}x$  а максимальная активная мощность будет равна  $P_{\text{акт.макс}} = 3U_{2\phi}^2 / (2x)$ .

Максимальное значение мощности дуг

$$P_{\text{д.макс}} = U_{2\phi}^2 / \left[ 2 \left( r + \sqrt{x^2 + r^2} \right) \right] \quad (4.74)$$

достигается при токе  $I_2'' = \frac{U_{2\phi}}{\sqrt{\left( \sqrt{x^2 + r^2} + x \right)^2}}$ .

В инженерных расчетах приведенные выше выражения могут быть с некоторой погрешностью использованы при несинусоидальных токах и напряжениях, если по параметрами электрического режима принять эквивалентные синусоидальные значения, действующие значения которых равны действующим значениям фактических токов и напряжений, а фазовые углы учитывают повышение индуктивного сопротивления на высших гармониках.

Для более точных расчетов требуется в расчетных соотношениях учитывать влияние высших гармоник и несимметрии по фазам режимов на все составляющие полной мощности и показатели качества потребляемой печью электроэнергии.

Основными отрицательными воздействиями рассматриваемых печей на питающую сеть, снижающими качество электроэнергии, являются: **колебания и отклонения питающего напряжения, его несинусоидальность, несимметрия** потребляемых токов, загрузка питающей сети **реактивной мощностью**, крайне **неравномерный график** потребления активной мощности, низкий **коэффициент мощности**.

Требования к качеству электрической энергии регламентируются ГОСТ 32144–2013. При проектировании и эксплуатации дуговых печей следует обратить особое внимание на обеспечение следующих нормативных показателей качества электроэнергии.

**Колебания и отклонения питающего ДСП напряжения** от номинального значения (**провалы напряжения, перенапряжения и быстрые изменения напряжения**), которые возникают из-за изменений сопротивления дуговой нагрузки, особенно сильных при расплавлении металлошихты, сопровождающиеся частыми обрывами дуги и эксплуатационными короткими замыканиями. Возникающие при этом резкие изменения потребляемого печью тока приводят к пропорциональному изменению падения напряжения на реактивном сопротивлении короткого замыкания в точке подключения к питающей сети. Согласно ПУЭ, толчки тока при эксплуатационных КЗ должны составлять не более 350% от но-

минального тока. Для выполнения этого требования реактивное сопротивление контура короткого замыкания должно быть не менее 35% от номинального активного сопротивления. В печах малой и средней мощности для ограничения колебаний тока вводят дополнительные реакторы, работающие только в период расплавления. В печах большой мощности основной вклад в реактивное сопротивление вносит короткая сеть. В таблице 4.4 для ДСП разной мощности с различным исполнением короткой сети приведены соответствующие значения сопротивления короткой сети и величины толчков тока при эксплуатационном коротком замыкании.

**Колебания напряжения** электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера: ощущения неустойчивости зрительного восприятия, вызванного световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени. Колебания питающего напряжения характеризуется *дозой фликера*, которая определяется согласно [32].

Таблица 4.4

#### Параметры коротких сетей ДСП мощностью от 2,8 до 60 МВА

Мощность МВА	Сопротивление короткой сети, мОм	Толчки тока при к.з., %	Схема короткой сети
2,8	$1,25 + j5,85$	390	Треугольник на шинном пакете
9	$0,79 + j4,11$	267	Несимметричный треугольник на электродах
25	$0,58 + j3,35$	205	
32	$0,5 + j2,8$	251	Расщепленная звезда
60	$0,49 + j3,97$	150	Триангулированная звезда
60	$0,64 + j4,65$	170	Расщепленная звезда

**Несинусоидальность питающего напряжения**, связанная с нелинейностью динамической вольт-амперной характеристики дуговой нагрузки характеризуется *суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения* (в % от номинального напряжения).

Печные понижающие или преобразовательные трансформаторы дуговых сталеплавильных печей допускается присоединять к электрическим сетям общего назначения без выполнения специальных расчетов колебаний напряжения и содержания в нем высших гармоник, если соблюдается условие:

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{T_i}^2}}{S_k} \leq 0,01D, \quad (4.75)$$

где  $S_{T_i}$  – номинальная мощность печного понижающего или преобразовательного трансформатора, МВ·А;

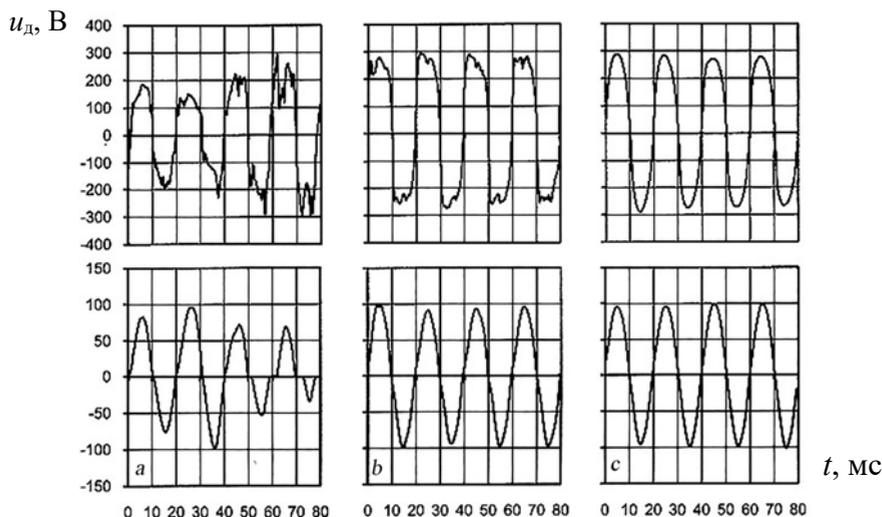
$S_k$  – мощность КЗ в месте присоединения установки дуговых печей к электрическим сетям общего назначения, МВ·А;

$n$  – число присоединяемых установок дуговых печей;

$D$  – коэффициент при установках дуговых сталеплавильных печей: переменного тока (ДСП), равный 1, а постоянного тока (ДППТ) – 2.

При невыполнении этого условия должно быть проверено расчетом, не превышаются ли допустимые действующим стандартом значения колебаний напряжения и (или) содержания в нем гармоник у электроприемников, получающих питание от электрической сети, присоединенной к данной точке.

Несинусоидальность питающего напряжения характеризуется также значениями коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка в процентах от напряжения основной гармонической составляющей. На рисунке 4.84 представлены осциллограммы напряжения и тока в разные периоды плавки стали в ДСП.



**Рис. 4.84. Искажение кривых напряжения на дуге (вверху) и тока (внизу) дуги в ДСП в разные периоды после начала плавки: a – сразу после включения; b – на 7-ой минуте; c – на 27-ой минуте после включения**

Если требования стандарта не выдерживаются и исчерпаны меры по снижению несинусоидальности потребляемого печью тока, следует присоединить установки дуговых сталеплавильных печей к точке сети с большей мощностью КЗ или обеспечить выполнение соответствующих мероприятий, обеспечивающих ограничение содержания гармоник напряжения в питающей сети общего назначения. Например, предусмотреть использование силовых фильтров и (или) быстродействующего тиристорного компенсатора реактивной мощности, а при использовании ДППТ – преобразователей с большим числом фаз выпрямления, а при четном числе преобразовательных трансформаторов – выполнение у половины из них обмотки ВН по схеме «звезда» и у второй половины – «треугольник». Для снижения отрицательного влияния ДСП на другие электропотребители того же предприятия, питание чувствительных к качеству напряжения потребителей и ДСП производят от разных секций шин ГПП, разных групп ращепленной вторичной обмотки головного трансформатора, либо увеличение мощности трансформатора ГПП.

Вариант выбирается в соответствии с технико-экономическим обоснованием.

Несимметрия трехфазной системы напряжений питающей ДСП сети обусловлена несимметричной по электродам печи нагрузкой или несимметрией элементов короткой сети. Показателями качества электроэнергии, относящимися к несимметрии напряжений питающей сети, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, значения которых нормируются согласно [32].

***Коэффициент мощности является мерой совершенства нагрузки как потребителя электроэнергии и определяется отношением активной мощности потребляемой нагрузкой к ее полной мощности.*** в цепях с нелинейными электрическими элементами (дугой, вентилями, транзисторами).

***Полная мощность потребителя это наибольшая активная мощность, которую он мог бы получить после определенного улучшения параметров своей электрической цепи*** (т.е. при отсутствии неактивных составляющих мощности). При этом должна соблюдаться эквивалентность обоих потребителей, например, равенство наибольшего нагрева оборудования (трансформаторов, генераторов, кабелей), для которого повышение температуры ограничивает отдаваемую сетью активную мощность.

В общем случае ***полная мощность  $S$***  как мера совершенства трехфазного потребителя электроэнергии содержит четыре составляющих: ***активную  $P$  и реактивную мощность  $Q$ , мощность искажения  $T$  и мощность несимметрии  $N$*** . Неактивные составляющие мощности ( $Q$ ,  $T$ ,  $N$ ) снижают качество потребителя электроэнергии, так как приводят к дополнительным потерям в питающей сети, нагреву и износу электрооборудования, ограничивают его пропускную способность, но не переходят в активную мощность нагрузки.

Могут быть заданы и другие условия, например, условие эквивалентности по потерям в используемых проводах. В зависимости от того, какое именно условие эквивалентности принято, получаются различные выражения для полной мощности трехфазного потребителя и ее составляющих [33]. Для цепи с нулевым проводом из условия эквивалентности по потерям следует следующее выражение для полной мощности:

$$S = \sqrt{\sum_{i=a,b,c} \sum_{k=1}^n U_{ik}^2} \sqrt{\sum_{i=a,b,c,0} \sum_{k=1}^n I_{ik}^2}, \quad (4.76)$$

Наиболее удобно и широко употребляется (основанное на критерии эквивалентности по нагреву) выражения для полной мощности трехфазной цепи без нулевого провода при несинусоидальности и несимметрии напряжений и токов.

$$S = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{s,i=a,b,c(s \neq i)} \sum_{k=1}^n U_{isk}^2} \sqrt{\sum_{s,i=a,b,c(s \neq i)} \sum_{k=1}^n I_{ik}^2}, \quad (4.77)$$

где  $i, s$  – номер фазы;

$k$  – номер гармоники;

$n$  – номер наивысшей гармоники;

$U_{ik}, U_{isk}$  – действующее значение  $k$ -й гармоники фазного и линейного напряжения соответственно (соответствующие мгновенные значения –  $u_{ik}, u_{isk}$ );

$I_{ik}$  – действующее значение  $k$ -й гармоники линейного тока (соответствующие мгновенные значения –  $i_{ik}$ ).

При использовании выражения (4.77) и для цепей с нулевым проводом потери в нулевом проводе не учитываются, что вносит некоторую погрешность в расчеты, но, как правило, не принимается во внимание. Для цепей, в которых имеются субгармоники и постоянные составляющие тока и/или напряжения (относительно промышленной частоты 50 Гц) в выражения (4.76) и (4.77) следует включать, соответственно, субгармоники и постоянные составляющие. Действующее значение линейного тока  $I_i$   $i$ -той фазы равно:

$$I_i = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{ik}^2}. \quad (4.78)$$

При синусоидальном симметричном питающем напряжении выражение (4.77) принимает более простой вид:

$$S = U_{\text{л}} \sqrt{\sum_{i=1}^m I_i^2} = U_{\text{л}} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n I_{ik}^2}, \quad (4.79)$$

а, если и ток синусоидален и симметричен по фазам, то приходим к привычному выражению

$$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}, \quad (4.80)$$

где  $U_{\text{л}}$  и  $I_{\text{л}}$  – действующие значения линейного напряжения и линейного тока.

При симметричном синусоидальном питающем напряжении, но несимметричном несинусоидальном токе представим трехфазную систему  $I_{m1}$  ( $m = a, b, c$ ) первых гармоник линейных токов как сумму симметричных прямой  $\dot{I}_{11}$ , обратной  $\dot{I}_{21}$  и нулевой  $\dot{I}_{01}$  последовательностей:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{11} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{b1} + a^2\dot{I}_{c1}), \\ \dot{I}_{21} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{b1} + a\dot{I}_{c1}), \\ \dot{I}_{01} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1}), \end{aligned} \quad (4.81)$$

где  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

Составляющие *токов обратной и нулевой последовательностей* определяют мощность несимметрии, а мощность искажения определяется высшими гармониками тока:

$$\begin{aligned} I_a^2 &= I_{a1}^2 + \sum_{i=2}^n I_{ai}^2, \\ I_b^2 &= I_{b1}^2 + \sum_{i=2}^n I_{bi}^2, \\ I_c^2 &= I_{c1}^2 + \sum_{i=2}^n I_{ci}^2, \end{aligned} \quad (4.82)$$

При наличии *субгармоник тока*, ими надо дополнить уравнения (4.82).

Поскольку, в соответствии с требованиями энергоснабжающих организаций в сетях электроснабжения поддерживается напряжение близкое к синусоидальному и симметричному по фазам, то для практических расчетов энергетических показателей в точках раздела с энергосистемой при несимметрии и несинусоидальности потребляемого тока обычно может использоваться выражение (4.79). При значительной несимметрии питающего напряжения или его несинусоидальности рекомендуется использовать более точное выражение (4.77).

*Активная мощность* равна сумме средних мгновенных мощностей фаз за период  $T$  питающего напряжения:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=a,b,c} \int_0^T u_i \cdot i_i \cdot dt \quad (4.83)$$

Соотношение между различными (выше обозначенными) составляющими полной мощности:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + T^2 + N^2. \quad (4.84)$$

Необходимо отметить, что реактивная мощность  $Q$  возникает и при отсутствии в цепи индуктивных и емкостных элементов. Реактивная мощность определяется сдвигом основной гармоники тока относительно основной гармоники напряжения. Поэтому ее также называют *мощностью сдвига*. Например, тиристорный регулятор напряжения при задержке управляющего импульса относительно моментов естественной коммутации потребляет реактивную мощность, даже если в цепи отсутствуют индуктивные и емкостные элементы.

*Мощность искажения* определяется нелинейностью сопротивления нагрузки, которая приводит к изменению формы кривой тока по сравнению с формой кривой питающего напряжения и отличию гармонического состава тока от спектра напряжения.

*Мощность несимметрии* определяется различием между сопротивлениями фаз нагрузки на основной частоте питающего напряжения, что приводит к появлению в потребляемом токе составляющих обратной и/или нулевой последовательности согласно (4.81).

*Коэффициент мощности*  $\alpha$ , характеризующий степень совершенства приемника электроэнергии, определяется как отношение активной мощности к полной мощности:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}}{S} = \\ &= \cos \varphi \cdot k_{\text{и}} \cdot k_{\text{н}}, \end{aligned} \quad (4.85)$$

где  $\cos \varphi$  – коэффициент сдвига,

$k_{\text{и}}$  – коэффициент искажения,

$k_{\text{н}}$  – коэффициент несимметрии.

Чем ближе указанные коэффициенты к 1, тем более совершенный приемник электрической энергии, тем более эффективно используется силовое электрооборудование, выше активная мощность и производительность электропечи. Низкие значения энергетических коэффициентов указывают на то, что установленная мощность трансформаторов и другого электрооборудования плохо используется. Следует стремиться, чтобы коэффициент мощности электродуговой установки был максимальным, по крайней мере, не ниже 0,9.

На практике, ДСП являются крупными потребителями реактивной мощности. При увеличении мощности печи естественный (т.е. без применения специальных средств) коэффициент мощности снижается. Коэффициент мощности также существенно зависит от периода плавки, что иллюстрируется табл. 4.5, в которой, в качестве примера, приведены некоторые средние значения коэффициента мощности ДСП. В действительности, изменение активной и реактивной мощностей носит случайный резко переменный характер.

Таблица 4.5

**Коэффициент мощности ДСП в разные периоды плавки**

Мощность, МВА	Коэффициент мощности		
	Плавка	Окисление	Восстановление
2,8	0,81	0,89	0,93
60	0,7	0,7	0,74

Потребление реактивной мощности происходит более неравномерно, чем активной. Во время эксплуатационных КЗ происходят наиболее значительные скачки реактивной мощности, достигающие 400% от номинального значения. Дисперсия реактивной мощности в остальные периоды плавки значительно меньше.

Низкие значения коэффициента мощности приводят к необходимости применять в схемах электроснабжения ДСП компенсацию реактивной мощности, что позволяет уменьшить потери электроэнергии в подводящих линиях и снизить уровень колебаний напряжения.

Для компенсации реактивной мощности, мощности искажения и мощности несимметрии ДСП применяют: статические конденсаторы переменного включения, управляемые реакторы и фильтры. Ведутся разработки по применению активных транзисторных преобразователей.

Реактивная мощность во время плавки содержит постоянную и переменную составляющие. Конденсаторы поперечного включения позволяют компенсировать постоянную составляющую реактивной мощности. Наибольшую сложность представляет компенсация переменной составляющей мощности во время плавки. В настоящее время эта задача может быть решена применением активных фильтров. Одновременно эти фильтры позволяют устранить высшие гармоники и несимметрию напряжения.

В дуговых печах колебания напряжения и тока разделяют на регулярные и нерегулярные. Нерегулярные, случайные толчки тока с частотой  $0,1 \div 1$  Гц вызваны замыканиями и обрывами дуги. С определенными допущениями случайные колебания описываются нормальным законом распределения. С вероятностью 0,95 такие колебания не превышают номинального значения тока, однако для периода расплавления колебания могут достигать до  $1,5 I_{ном}$ . Дисперсия колебаний снижается с увеличением мощности печи (см. табл. 4.6).

Таблица 4.6

**Дисперсия колебаний тока для печей разной вместимости**

Мощность МВА	Дисперсия $D / I_{ном}$
2,8	0,174
32	0,116

Регулярные колебания токов с частотой  $2 \div 10$  Гц вызываются перемещением дуг, вибрацией электродов, изменениями проводимости в зоне горения, колебаниями элементов токоподвода и поверхности жидкого металла и т.д. Эти колебания не превышают 50% от номинального тока. Следует заметить, что колебания режима в каждой из фаз могут возникнуть при изменении режима в других фазах, что связано с явлениями перекоса и переноса мощности между фазами.

Колебания питающего напряжения обусловлены падением напряжения на реактивных сопротивлениях элементов питающей сети от печного трансформатора до точки подключения к энергосистеме и вызваны толчками токов. Они характеризуются размахом колебаний и частотой. Для частот  $0,1 \div 1$  Гц с наибольшими колебаниями допустимая величина колебаний напряжения составляет  $1,5 \div 2\%$ . Колебания напряжения на шинах печной подстанции ДСП достигают больших значений и далеко выходят за допустимые пределы (см. табл. 4.7). Это неблагоприятно сказывается на работе других приемников, которые часто располагаются на том же промышленном предприятии.

Таблица 4.7

#### **Колебания напряжения на вводе ДСП при различной мощности печного трансформатора**

Мощность трансформатора ДСП, МВА	Колебания напряжений, %
2,8	$10 \div 15$
25	$6,5 \div 9$
32	8,5
60	$7 \div 9$

Величина скачка тока при КЗ определяется параметрами печного контура.

Часто на предприятии устанавливается группа из нескольких дуговых нагрузок. Наибольшее распространение получили варианты двух или трех одинаковых печей в группе. Зависимость графиков таких нагрузок обуславливается общностью программы цеха. Особенно влияет на характер согласованности графиков работы печей наличие в цехе установок непрерывной разливки стали и ограничения электропотребления. В то же время циклы плавок отдельных печей сдвинуты случайным образом. Наиболее тяжелым режимом системы электроснабжения является совпадение во времени периодов расплавления на нескольких печах. С увеличением их числа в группе размах колебаний напряжения на шинах ГПП растет. Однако он не является арифметической суммой колебаний напряжения от отдельных печей, так как их броски тока во времени, как правило, не совпадают. Несимметрия токов и напряжений. Обычно различают статическую и динамическую несимметрии.

Статическая несимметрия вызвана неодинаковостью сопротивления токопровода и контактных соединений. Коэффициент асимметрии может достигать 30%, что приводит к неравенству выделения мощности в электродах и появлению «дикой» и «мертвой» фаз. Основным направлением снижения статической несимметрии является тщательная разработка короткой сети. Наиболее совершенные варианты короткой сети позволяют снизить статическую несимметрию до 3–5%.

Динамическая несимметрия вызывается неодинаковостью условий зажигания дуг под различными электродами, несовпадением моментов эксплуатационных КЗ и т.д. На рисунке 4.85 представлен график колебаний коэффициента искажения тока ( $K_{иск. I}$ ), показывающий, что динамическая несимметрия различных фаз ДСП может достигать 400%.

$$K_{иск. I} = \frac{100 \cdot \sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1}$$

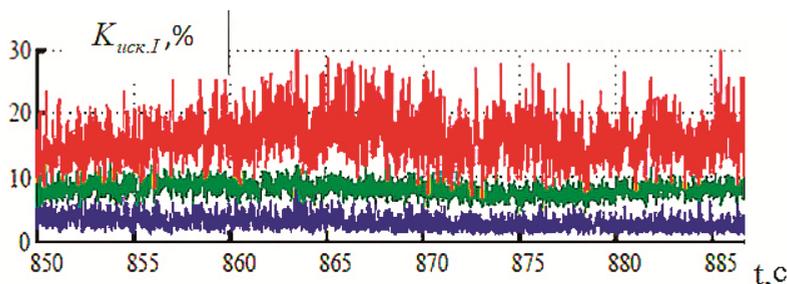


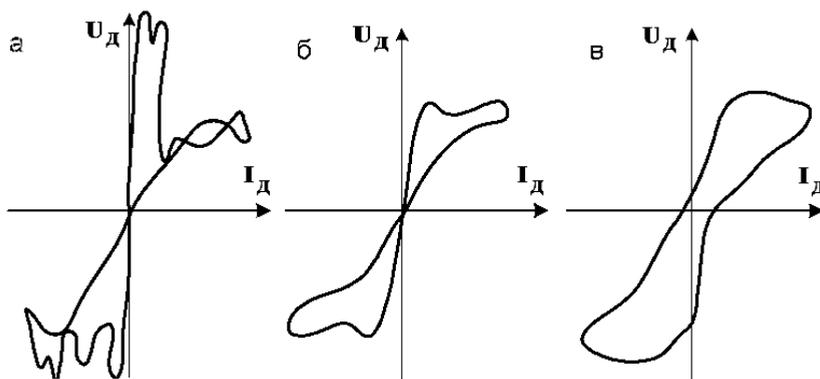
Рис. 4.85. Коэффициент искажения тока трех фаз ДСП-180 через 850 секунд после начала плавки

Коэффициент несимметрии напряжения можно определить как отношение суммы составляющих напряжения обратной и нулевой последовательностей основной частоты к номинальному напряжению.

Несимметрия напряжений больше всего сказывается на работе электродвигателей. Допустимая величина коэффициента несимметрии напряжения составляет менее 2%. Существует методика расчета несимметрии.

Для нескольких печей, выполненных по одному проекту и сфазированных на стороне первичного напряжения, «мертвая» и «дикая» фазы совпадают. Таким образом, полученные для каждой печи коэффициенты несимметрии складываются. Для уменьшения несимметрии напряжений необходимо выполнять согласование графиков нагрузок различных дуговых нагрузок, поскольку наибольшая несимметрия наблюдается в период расплавления. Режим работы ДСП характеризуется несинусоидальностью токов и напряжений, которая вызвана нелинейностью электрической дуги как приемника электроэнергии. Степень проявления нелинейности зависит от состава шихты конструкции печи и организации технологического процесса плавки стали.

В печах, использующих загрузку шихты со сдвигом свода, расплавление шихты начинается при неустойчивом горении дуг, частых их обрывах и эксплуатационных коротких замыканиях. Пятно привязки дуги постоянно перемещается с одних кусков шихты на другие. В этот начальный период плавки ток и напряжение дуги существенно искажены (рис. 4.86 а). После проплавления в шихте колодцев динамическая вольт-амперная характеристика (ДВАХ) дуги (рис. 4.86 б) сохраняет особенности ДВАХ начального периода расплавления, однако переходы от одного участка характеристики к другому происходят плавно. Это свидетельствует об улучшении тепловых условий горения дуги, в результате чего градиент напряжения в столбе дуги снижается и, соответственно, длина дуги увеличивается. Благодаря этому колебания режима уменьшаются. В период расплавления наблюдается несимметрия ВАХ и возникает постоянная составляющая, которая может достигать 12%. В периоды окисления и восстановления нелинейность дуги значительно снижается (рис. 4.86 в), так как дуга горит на ванну расплавленного металла.



**Рис. 4.86. Динамические характеристики ДСП:**

а – в начале периода расплавления; б – после проплавления колодцев; в – период рафинирования

Эти закономерности горения дуги сказываются на гармоническом составе токов и напряжений. Искажения кривых токов и напряжений различны по фазам печи, имеют вероятностный характер и изменяются по периодам плавки. Наличие магнитной несимметрии между фазами короткой сети обуславливает возрастание доли гармоник в токе ДСП. Искажения кривых тока (см. гармонический состав в табл. 4.8) и напряжения оказывает существенное воздействие на характеристики печей, ухудшая параметры токопровода и условия передачи мощности к ванне. При повышении доли гармоник значительно возрастают потери в металлоконструкциях печи, их нагрев и вероятность аварийных ситуаций. Особенно заметное влияние оказывает несинусоидальность тока на коэффициент мощности, который ухудшается за счет появления мощности искажений.

## Гармонический состав тока ДСП

Номер гармоник	ДСП-25		ДСП-100		ДСП-200	
	Плавка	Рафин.	Плавка	Рафин.	Плавка	Рафин.
2	9,5	2	5,1	2,7	6,8	3
3	4,8	3	7,2	3,2	5,1	2,4
4	4,8	0,3	2,3	1,4	4,2	0,8
5	6	2,9	5,5	1,1	2,6	0,6
7	1,3	1,2	2,1	1	0,7	0,2
9	0,2	0,3	1	0,5	0,3	0,3

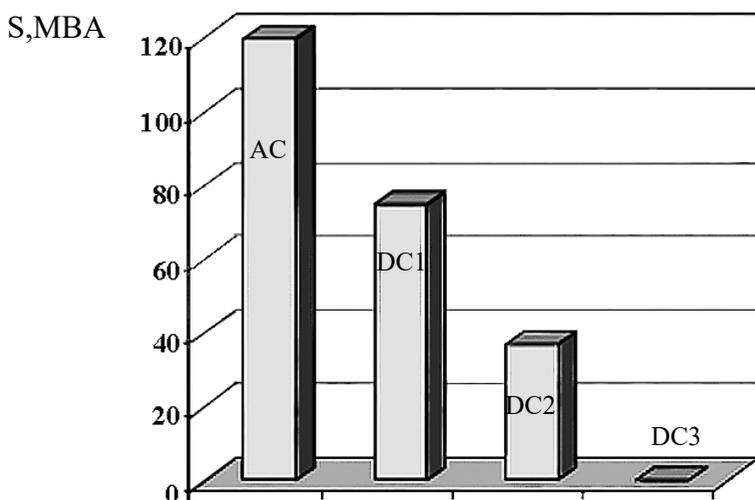
В ряде случаев, когда на предприятии, использующем ДСП установлены групповые емкостные компенсаторы реактивной мощности, во внутривоздушной сети электроснабжения могут возникнуть резонансные явления. В этом случае на резонансной частоте могут возникнуть перенапряжения, которые приводят к выходу из строя конденсаторных батарей. Чувствительны к воздействию гармоник также синхронные компенсаторы и синхронные двигатели. Для исключения нежелательных воздействий генерируемых ДСП гармоник на чувствительные электроприемники подключают их к разным шинам ГПП или устанавливают фильтры, подавляющие резонансные и другие гармоники.

В дуговых сталеплавильных печах постоянного тока острота проблемы влияния на питающую сеть снимается. Мощность несимметрии отсутствует полностью. Эксплуатационные короткие замыкания и обрывы дуги происходят крайне редко, только при ошибках в ведении плавки. Реактивная мощность и мощность искажения значительно снижаются по сравнению с ДСП и при использовании эффективных современных схемных решений и технических средств могут быть уменьшены до уровня, не требующего установки каких-либо фильтрокомпенсирующих устройств.

На рисунке 4.87 показана диаграмма мощности установки типа Статком, необходимой для компенсации реактивной мощности дуговой печи с трансформатором мощностью 75 МВА. Требуемая мощность установки статической компенсации для печи переменного тока превышает мощность печи на 60%. При использовании ДППТ 2-го поколения такой же мощности с современным тиристорным выпрямителем требуемая мощность статического компенсатора в 2 раза ниже мощности печи. Если же вместо тиристорного выпрямителя использовать источник питания постоянного тока 3-го поколения, то устройство компенсации реактивной мощности не требуется. Низкий уровень искажений позволяет подключать ДППТ к относительно маломощным сетям электроснабжения. Соответствующие технические решения рассмотрены ниже.

Важным технико-экономическим показателем системы питания печи является коэффициент использования установленной мощности, который равен отношению активной мощности печи к полной мощности всего источника питания. На основании данных, показанных на рис. 4.87, можно сделать вывод, что по эффективности использования установленной мощности энергооборудования системы питания печи современная ДППТ третьего поколения значительно лучше печи переменного тока.

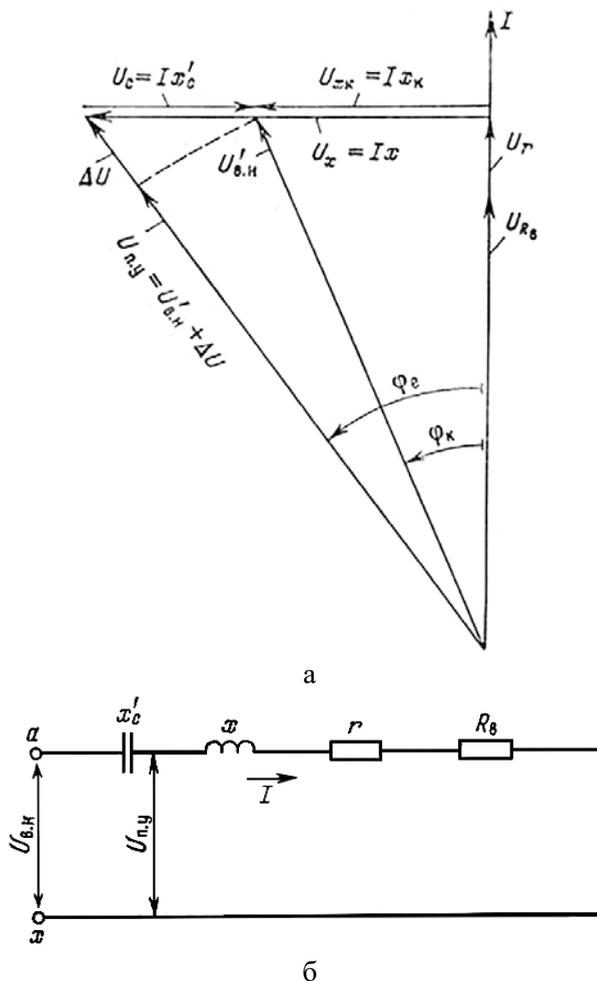
Руднотермические печи оказывают такие же, но менее жесткие воздействия на питающую сеть, что и ДСП. Дуга в РТП значительно более устойчива на всем протяжении работы печи и искажение формы тока и напряжения значительно слабее, чем в ДСП. В РТП, в которых дуга отсутствует, не возникает и гармоник в кривых тока и напряжения. График нагрузки РТП, работающих в непрерывном режиме, достаточно ровный. На качество потребляемой РТП электроэнергии наиболее существенное влияние оказывают большая реактивная мощность и несимметрия электрического режима по фазам. В отличие от ДСП параметры электрического режима РТП изменяются плавно, что позволяет использовать установки продольноемкостной компенсации (УПК).



**Рис. 4.87. Мощность установок емкостной компенсации типа Статком для разных типов питания ДСП и ДППТ мощностью 75 МВт: ДСП (AC); классической ДППТ (DC1); ДППТ 2-го поколения (DC2); ДППТ 3-го поколения (DC3)**

Схема замещения и векторная диаграмма, поясняющие принцип действия УПК приведены на рис. 4.88 [34]. При последовательном включении конденсаторной батареи в контур печи его эквивалентное реактивное сопротивление  $x_k = x - x_c$  снижается на величину реактивного сопротивления конденсаторной

батареи  $x_c$ . При изменении тока печи автоматически сохраняется степень компенсации реактивной мощности, так как реактивные падения напряжения на индуктивном сопротивлении короткой сети и на емкостном сопротивлении конденсаторной батареи пропорциональны рабочему току печи.

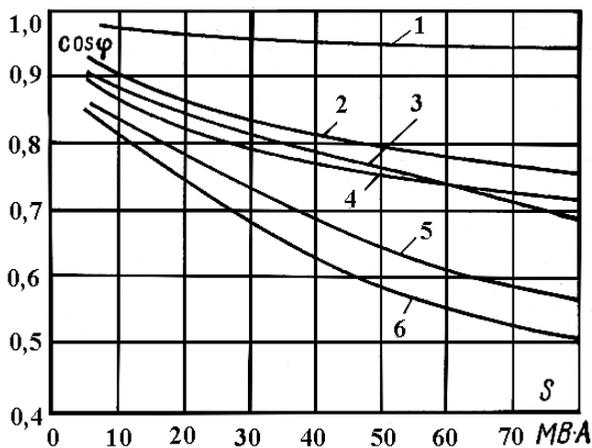


**Рис. 4.88. Векторная диаграмма (а) установки продольноемкостной компенсации РТП и ее эквивалентная схема(б):**

$U_{в.н}$ ,  $U_{п.у}$  – первичное и вторичное напряжения печного трансформатора РТП,  
 $I$  – ток,  $x$  и  $r$  – реактивное и активное сопротивления короткой сети,  
 $x'_c$  – сопротивление конденсаторной батареи,  $R_B$  – сопротивление ванны печи,  
 $\varphi_c$ ,  $\varphi_k$  – фазовый угол естественный (без УПК) и при компенсации

Руднотермические печи являются мощными и массовыми потребителями электроэнергии. Их единичная мощность превышает 100 МВА. Поэтому имеют высокое значение качественные показатели РТП как электропотребителя.

В первую очередь, это относится к потребляемой реактивной мощности. На рисунке 4.89 показана зависимость естественного коэффициента сдвига ( $\cos \varphi$ ) от мощности РТП, предназначенных для производства различных продуктов. Для ряда продуктов мощные печи имеют  $\cos \varphi$  ниже 0,7, что крайне невыгодно экономически и затрудняет управление процессом.



**Рис. 4.89. Зависимость  $\cos \varphi$  от мощности РТП:**

- 1 – фосфорная трехэлектродная, 2 – силикомарганцевая шестиэлектродная,
- 3 – ферромарганцевая шестиэлектродная,
- 4 – ферросилициевая и силикомарганцевая трехэлектродные,
- 5 – ферромарганцевая трехэлектродная,
- 6 – силикоалюминиевая трехэлектродная печи

При значении  $\cos \varphi$  выше  $0,88 \div 0,92$  установка индивидуальных систем компенсации реактивной мощности требует экономического обоснования. Этим значениям коэффициента сдвига соответствуют предельные мощности печей  $S_{пр.к}$ , для которых не требуется установка систем искусственной компенсации реактивной мощности.

С точки зрения ведения технологического процесса характерной величиной является такое значение коэффициента сдвига  $\cos \varphi_{P_{н.маx}}$ , которое соответствует максимуму полезной мощности  $P_{н.маx}$  на кривой электрической рабочей характеристики, представляющей зависимость полезной мощности от тока в электродах. Эта величина определяется соотношением активных и реактивных сопротивлений печи:

$$\cos \varphi_{P_{н.маx}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{r}{\sqrt{r^2 + x^2}}} . \quad (4.86)$$

Для мощных РТП  $\cos\varphi_{P_{л.мак}}$  равен  $0,75 \div 0,78$ . При работе печи с  $\cos\varphi$  меньшим, чем эта величина, подъем электродов, вызывающий снижение тока, приводит к увеличению полезной мощности и наоборот, опускание электродов будет сопровождаться снижением полезной мощности. Это противоречит освоенной технологии и практике управления печами. Таких печей, как правило, не строят. Следует учитывать, что коэффициент сдвига должен быть не ниже  $\cos\varphi_{P_{л.мак}}$  на всех ступенях напряжения печного трансформатора, что соответствует среднему значению  $\cos\varphi \geq 0,78 \div 0,82$ . В таблице 4.9 приведены предельные значения мощности печей для различных продуктов.

Для печей, мощность которых превышает предельную величину  $S_{пр}$  используются установки УПК либо питание постоянным током или током пониженной частоты. Включение УПК улучшает электрические характеристики печи, как показано на рис. 4.90.

Применение УПК для РТП, мощность которых превосходит величину  $S_{пр}$  (табл. 4.9) позволяет работать на восходящей части электрической рабочей характеристики. На рисунке 4.90, в качестве примера, построены электрические характеристики одной фазы шестиелектродной печи для силикомарганца с использованием УПК и без его использования.

Таблица 4.9

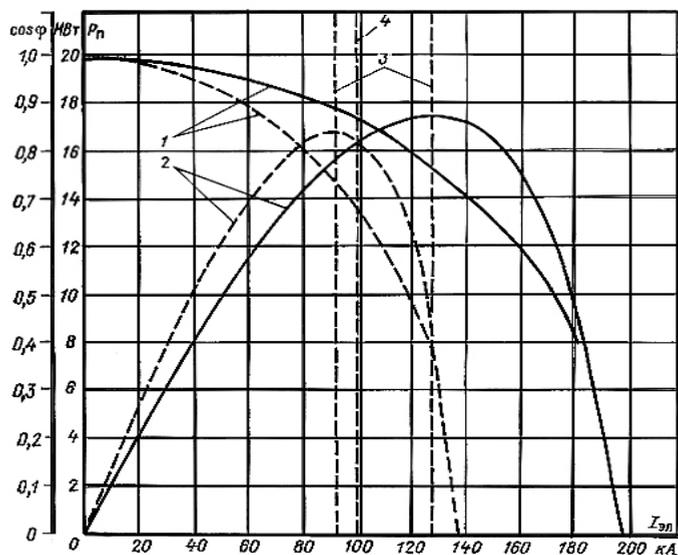
### Предельные мощности руднотермических печей

Наименование продукта	Тип печи	$S_{пр.к}$	$S_{пр}$
		МВ·А	МВ·А
Карбит кальция	Трехэлектродная с прямоугольной или круглой ванной	15–20	60–70
Ферромарганец	Трехэлектродная с круглой ванной	6	13–16
То же	Шестиелектродная с прямоугольной ванной	10	35–40
Силумин	Трехэлектродная с круглой ванной	2	8–12
То же	Шестиелектродная с прямоугольной ванной	8	20–28
Ферросилиций и силикомарганец	Трехэлектродная закрытая печь	10–12	24–30
То же	Шестиелектродная с прямоугольной ванной	12–15	45–50

Требуемая на этой печи полезная мощность одной фазы  $P_{л} = 16,25$  МВт при рабочем токе в электродах  $I_{эл} = 98$  кА без УПК могла бы быть достигнута на ступени напряжения трансформатора 280 В. Согласно электрическим характеристикам, показанным штриховыми линиями на рис. 4.90, коэффициент сдвига без УПК составил бы 0,68 и печь работала бы на падающей части электрической характеристики.

При наличии УПК та же полезная мощность достигается при напряжении трансформатора 204 В при  $\cos\varphi = 0,87$ . При этом рабочая точка оказывается на восходящей части электрической характеристики, а мощность трансформатора существенно ниже, чем в варианте без УПК.

Использование тока пониженной частоты оказывает на электрические характеристики влияние, аналогичное УПК, так как пропорционально снижению частоты тока уменьшается реактивное сопротивление печного контура. На приведенных на рис. 4.91 электрических характеристиках печи для выплавки ферросилиция мощностью 24 МВА, дополнительно показана зависимость от тока ряда параметров: электрического к.п.д.  $\eta_{эл}$ , мощность электрических потерь  $P_{пот}$ , полезное напряжение  $U_{пол}$ , номинальный ток  $I_H$ .

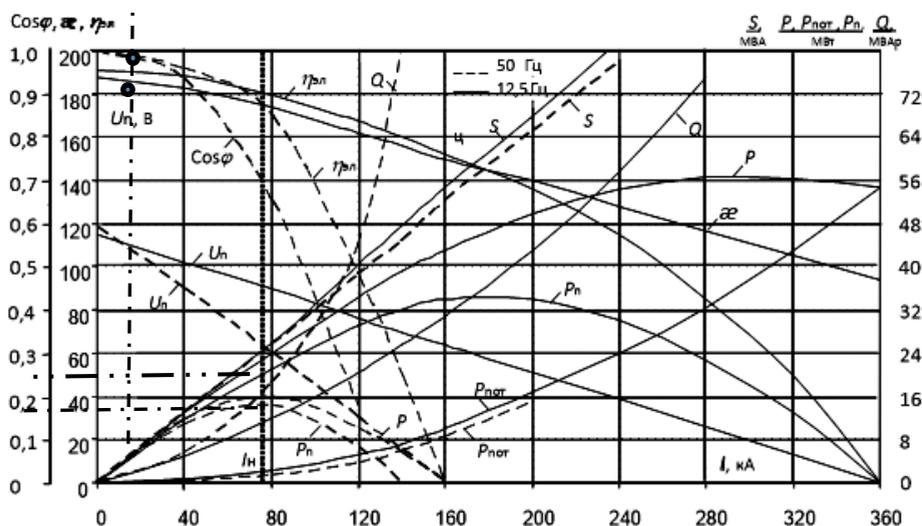


**Рис. 4.90. Электрические характеристики одной фазы шестизлектродной печи для производства силикомарганца:**

1 – коэффициент мощности, 2 – полезная мощность,

3 – токи, соответствующие максимуму полезных мощностей, 4 – рабочий ток,  $I_{эл}$  – ток электрода

Приведенные на рис. 4.91 характеристики построены для модернизации действующей ферросплавной печи с тремя однофазными трансформаторами (мощностью по 8 МВА каждый) и короткой сетью, выполненной по схеме «треугольник на электродах». Тиристорный преобразователь частоты, выполненный по схеме рис. 4.104, был включен в разрыв короткой сети после вторичных выводов печных трансформаторов. Из представленных характеристик следует, что снижение частоты тока позволяет повысить коэффициент мощности, электрический к.п.д. и полезную мощность печи без замены печных трансформаторов. Как было ранее отмечено, кроме повышения энергетических характеристик, использование тока пониженной частоты позволяет улучшить работу электродов (благодаря снижению поверхностного эффекта и эффекта близости), интенсифицировать перемешивание расплава в ванне печи.



**Рис. 4.91. Сравнительные электрические характеристики РТП для производства ферросилиция мощностью 24 МВА при промышленной (пунктир) и пониженной (сплошная линия) частотах**

В таблице 4.10 приведен спектр сетевого тока НПЧ, питающего РТП мощностью 24 МВА, рассчитанный с помощью математической модели и экспериментально снятый на печи. Расхождение амплитуд гармоник, рассчитанных на ЭВМ и определенных экспериментально, не превышает 5–7%, причем расчетные значения высших гармоник могут использоваться для оценки их максимального воздействия на питающую сеть, которое не превысило нормативных требований к качеству питающего напряжения.

Уровень гармоник в сетевом токе РТП мощностью 24 МВА при частоте рабочего тока 7 Гц, определенный расчетом ( $I_{I, P}$ ) и экспериментально ( $I_{I, V}^3$ ).

Питание РТП постоянным током позволяет еще в большей степени повысить энергетические характеристики печей по сравнению с использованием тока пониженной частоты, так как при этом исключаются субгармоники тока и напряжения (с частотой ниже 50 Гц). Как было показано ранее в разделе 4.1.11 при использовании схемы питания печи с проводящей подиной рабочий ток проходит через всю глубину ванны расплава, что улучшает распределение мощности и благоприятно сказывается на энергетических и технологических показателях процесса плавки. В отличие от использования пониженной частоты, не требующей изменения конструкции печной ванны, для реализации питания РТП постоянным током необходимо снабдить ее проводящей подиной.

## Спектр сетевого тока НПЧ

$f$ , Гц	$\nu$	$\nu_{50}$	$I_{IV}^P$ , %	$I_{IV}^3$ , %
7	1	–	2,1	8,7
36	5	–	–	3,6
43	6	–	4,5	2,5
50	7	1	100,0	100,0
57	8	–	3,6	3,0
79	11	–	5,7	2,0
93	13	–	8,1	7,9
136	19	–	2,7	2,5
164	23	–	2,8	2,4
221	31	–	3,1	2,6
243	34	–	1,9	2,0
250	35	5	17,0	16,2
257	36	–	2,2	2,5
293	41	–	–	3,0
350	49	7	9,1	6,4
550	77	11	5,2	2,6

Вакуумные дуговые печи питаются постоянным током и не создают проблем, связанных с обеспечением электромагнитной совместимости с питающей сетью. Электрошлаковые печи, которые в большинстве случаев являются однофазными, нагружают питающую сеть мощностью несимметрии и реактивной мощностью, а также создают определенные сложности из-за неравномерного графика потребления электроэнергии, поскольку являются печами периодического действия. Известные схемы Штеймца или Скотта, а также параметрические источники тока, используемые для симметрирования нагрузки по фазам питающей сети и компенсации реактивной мощности, в установках ЭШП применения практически не нашли из-за сложности настройки их параметров при изменениях режима нагрузки.

Представляет интерес питание ЭШП током пониженной частоты, позволяющее решить проблемы электромагнитной совместимости и дающее важные технологические преимущества (см. раздел 4.4) по сравнению с током промышленной частоты. Использование схем непосредственного преобразования частоты (НПЧ) позволяет полностью симметризовать потребляемую из сети мощность, и повысить коэффициент мощности установок ЭШП до  $0,88\div 0,92$ .

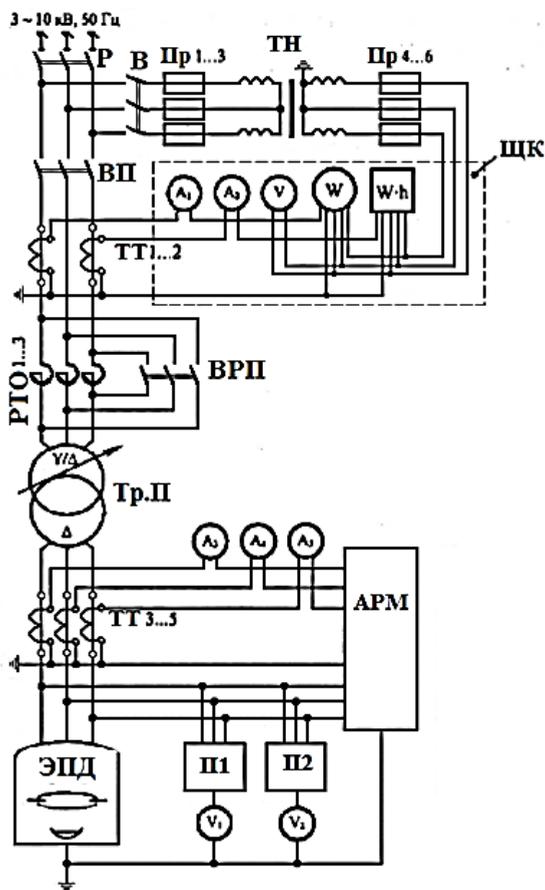
#### 4.7. Электротехническое и энергетическое оборудование, электроснабжение ДСП, РТП, ВДП и ЭШП

Современные ДСП подключаются, как правило, к трехфазным сетям и относятся ко второй категории по надежности электроснабжения. Наиболее часто ДСП классифицируются по вместимости печей, при этом они разделяются на три группы:

– печи малой вместимости (0,5–6 т) с трансформаторами мощностью 1–4 МВА подключаемыми к шинам 6 или 10 кВ заводских подстанций;

- печи средней вместимости (10–50 т) с трансформаторами мощностью 5–35 МВА и напряжением первичной обмотки 6, 10, 35 кВ;
- печи большой вместимости (более 80 тонн) с трансформаторами мощностью до 260 МВА и напряжения первичной обмотки 35, 110, 220 кВ.

В мировой практике наблюдается тенденция увеличения вместимости печей до 300–400 и более тонн с увеличением мощности печных трансформаторов до 300 МВА. К основному электрооборудованию ДСП относят: печь с электродами, ванной и исполнительными механизмами; печной трансформатор; реакторы; короткую сеть; коммутационную, измерительную и защитную аппаратуру. ДСП малой вместимости, изготовленные до 1990 г., имеют схемы электропитания подобные приведенной на рис. 4.92.



**Рис. 4.92. Схема электропитания ДСП малой вместимости:**

(*W*–ваттметр, *V*–вольтметры, ЭПД–электрическая печь дуговая,

Тр.П–трансформатор печной, РТО–реактор токоограничивающий, Р–разъединитель, ВП–выключатель печи силовой ВН, ВРП–выключатель реактора печи, В–выключатель ТН, Пр–предохранители, АРМ–автоматический регулятор мощности, ЩК–щит контроля, ТН, ТТ–трансформаторы напряжения и тока измерительные, П1, П2–переключатели *V*1 и *V*2, *Wh*–счетчик активной электроэнергии)

Первичная цепь такой печи состоит из последовательно соединенных кабелей и аппаратов высокого напряжения, реактора и первичной обмотки трансформатора. Вторичная цепь состоит из последовательно соединенных вторичной обмотки трансформатора, токопроводов короткой сети, соединяющих вторичные выводы трансформатора с электродами печи; электродов и электрических дуг. Цепи измерения и защиты подключены к измерительным трансформаторам тока и напряжения.

Схема электроснабжения крупной дуговой сталеплавильной печи вместимостью 180 т (ММК, г. Магнитогорск), производства фирмы *Siemens VAI* приведена на рис. 4.93. Питание печи производится от мощной сети электроснабжения 220 кВ. Сетевым трансформатором (СТ, мощностью 160/250 МВА) сетевое напряжение понижается до 35 кВ, подается на печной трансформаторный агрегат (ПТ) мощностью 150 МВА, состоящий из трех активных частей: головного трехобмоточного трансформатора (ГТ), реактора (Р) и вольтодобавочного трансформатора (ВДТ).

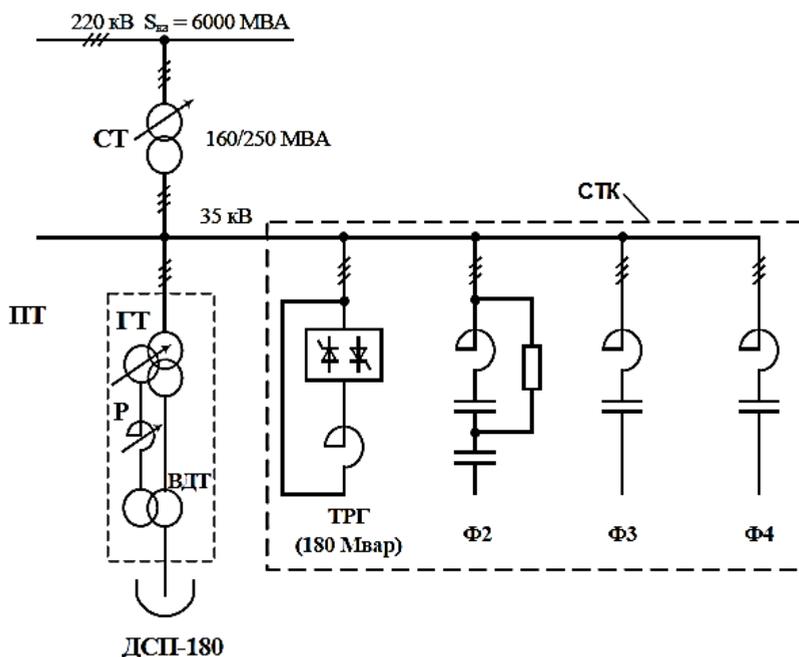
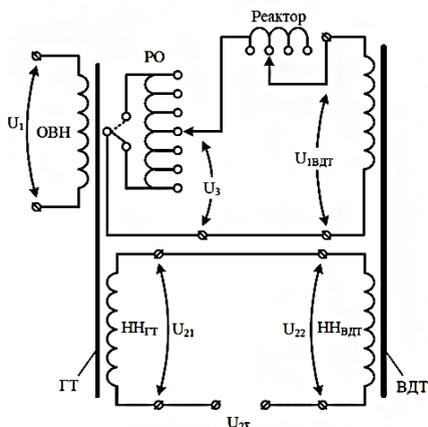


Рис. 4.93. Однолинейная силовая схема электроснабжения ДСП-180

Регулирование рабочего напряжения осуществляется путем переключения отпаяк обмотки среднего напряжения главного трансформатора с помощью регулятора под нагрузкой (РПН). Реактор выполнен также с переключением числа витков с помощью РПН, что позволяет изменять индуктивность печного контура по ходу плавки. На рисунке 4.94 представлена силовая схема и фото активной части.



**Рис. 4.94. Силовая схема и активная часть печного трансформатора мощностью 150 МВА печи вместимостью 180 т**

Мощные печные трансформаторы имеют принудительное охлаждение с искусственной циркуляцией масла через теплообменник, снабжены устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), производящими до 160 переключений в сутки. Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме «треугольник–треугольник» с возможностью переключения по схеме «звезда–треугольник», что позволяет увеличивать диапазон регулирования. Резко неравномерный график нагрузки трансформатора делает нецелесообразным выбирать номинальную мощность трансформатора равной максимальной мощности в период расплавления, так как в течение остальной части цикла трансформатор оказывается недогруженным. У печных трансформаторов российских производителей обычно предусмотрена возможность длительной перегрузки на 10–20%. Соответственно мощность печного трансформатора выбирают меньше максимальной в стадии расплавления. Условные обозначения для печных трансформаторов: буква Э означает, что трансформатор печной; О – для однофазных и Т – для трехфазных; естественная циркуляция воздуха и масла – М, принудительная – ДЦ, принудительная циркуляция воды и масла Ц; Н – с устройством РНП; К – кабельный ввод с высокой стороны трансформатора. В цифровой части буквенного обозначения указывается типовая мощность (в кВА) и первичное напряжение (в кВ).

Реактор служит для ограничения бросков тока при эксплуатационных КЗ и повышения устойчивости горения дуг за счет создания падающей характеристики цепи питания. У работающих непрерывно дуговых печей режим работы реактора прерывистый, условия его работы тяжелые, поэтому он должен удовлетворять повышенным требованиям термической и механической прочности. Реактор включается между сетью и линейными зажимами обмотки высокого напряжения трансформатора или в «фазу» – последовательно с данной обмоткой. Чаще всего реактор располагают в общем кожухе с печным трансформатором. Толчки тока эксплуатационных КЗ, согласно ПУЭ, не должны превышать  $3,5I_n$ , поэтому суммарное

индуктивное сопротивление контура дуги должно быть более  $(I_{н} / I_{max})100\% = 35\%$  от активного сопротивления контура. В печах большой мощности – это условие выполнено за счет большого индуктивного сопротивления короткой сети и реактор можно не применять. Тем не менее включение реактора позволяет повысить устойчивость электрического режима в период расплавления. Для печей малой и средней мощности реактивное сопротивление печных трансформаторов  $6\div 10\%$ , короткой сети  $5\div 10\%$ , реактора  $15\div 20\%$ . Реактор включается в период расплавления, в остальные периоды шунтируется выключателем.

Согласно ПУЭ для печных трансформаторов ДСП должны быть предусмотрены:

1) максимальная токовая защита без выдержки времени от двух- и трехфазных КЗ в обмотке и на выводах, отстроенная от токов эксплуатационных КЗ и бросков намагничивающего тока при включении установок;

2) газовая защита от повреждения внутри бака, сопровождающегося выделением газа, и от понижения уровня масла в баке;

3) защита от однофазных замыканий на землю в обмотке и на выводах печных трансформаторах, присоединенных к электрической сети с эффективно заземленной нейтралью;

4) защита от перегрузок для установок всех видов дуговых печей. Для ДСП рекомендуется предусматривать защиту с зависимой от тока характеристикой выдержки времени. Защита должна действовать с разными выдержками времени на сигнал и отключение.

5) защита от повышения температуры масла в системе охлаждения печного трансформатора с использованием датчиков максимально допустимой температуры;

6) защита от нарушения циркуляции масла и воды в системе охлаждения для печного трансформатора с принудительной циркуляцией масла и воды.

Высоковольтный печной выключатель обеспечивает оперативное включение и выключение печного трансформатора в нормальном режиме, а также автоматическое отключение при длительных эксплуатационных КЗ. Вместо ранее использовавшихся масляных и воздушных выключателей в настоящее время используются вакуумные выключатели, имеющие большой ресурс и надежность.

Для поддержания оптимального режима работы печи устанавливаются автоматические регуляторы мощности печи. Такие регуляторы воздействуют на механизм передвижения электродов, изменяют длину дуги и поддерживают заданное значение мощности ДСП. Для повышения точности регулирования созданы автоматизированные системы управления ДСП.

С началом интенсивного использования микропроцессорных схем управления (с девяностых годов прошлого века) произошла замена аналоговых систем на цифровые. На рисунке 4.95 пунктиром обведены системы, которые в настоящее время полностью переведены на микропроцессорную базу. Одновременно значительно расширились функции систем управления ДСП.



Современные дуговые печи представляют собой полностью компьютеризованные комплексы, в которых автоматизированы не только исполнительные механизмы, но и процессы принятия решений по управлению электрическим режимом и технологическим процессом, а также диспетчерские функции. В алгоритмах широко используются мощные математические методы нейронных сетей, нечеткой логики, теории нестационарных стохастических процессов. Мировыми лидерами производства систем автоматического управления электрическим режимом ДСП являются *Siemens VAI* (в настоящее время *Primetals Technologies*) (системы управления *ArCOS* и *Simelt*), *DANIELI* (системы *Hi-REG* и *Q-REG*). Не менее успешной является разработанная под руководством А.А.Николаева (МГТУ, г. Магнитогорск [12, 13, 35]) российская система управления САУЭР ДСП, функциональная схема которой представлена на рис. 4.95.

Средства видеомониторинга объекта и визуализации скрытых процессов, системы прогнозирования и интеллектуальной поддержки принятия решений оказывают сталевару мощную информационную поддержку, помогают избежать ошибок и оптимизировать процесс плавки. На рисунке 4.96 представлен пример реализации фирмой *DANIELE* пульта управления ДСП.

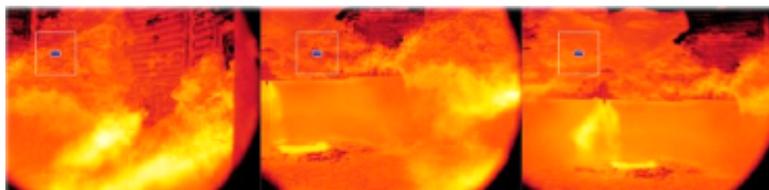


Рис. 4.96. Пульт управления крупной ДСП фирмы *DANIELI*

Для достижения высоких показателей плавки большое значение имеет автоматизация ввода в печь различных материалов, замеров температуры и отбора проб металла и других технологических операций. На рисунке 4.97 показаны роботизированные манипуляторы фирмы *BSE* (Германия), обеспечивающие различные операции через рабочее окно ДСП: вдувание в ванну кислорода и угольного порошка ниже уровня шлака с помощью фурм и кислородных трубок, замеры температуры и взятие проб металла без выключения печи. С помощью манипулятора внутрь печи после окончания плавки вводится видеочамера, позволяющая осмотреть состояние футеровки (рис. 4.98), а также инжектор, позволяющий нанести торкретмассу на поврежденные участки футеровки.



**Рис. 4.97. Роботизированные манипуляторы фирмы BSE (Германия)**



**Рис. 4.98. Видеоконтроль состояния футеровки**

Управление подачей технологических газов в манипуляторы осуществляется дистанционно с помощью клапанного стенда, показанного на рис. 4.99.



**Рис. 4.99. Клапанный стенд**

От выводов вторичной стороны трансформаторов на электроды дуговой печи напряжение передается по токопроводу, который называют короткой сетью. Токопроводы короткой сети пропускают большие токи – до 100 кА и выше. Выполняются обычно из меди, но для удешевления используется и алюминий. Короткая сеть ДСП (рис. 4.100) состоит из участков жестко закрепленных шинопроводов или трубошин и гибких проводников.

Различают следующие участки короткой сети:

1) компенсаторы – гибкие медные ленты, соединяющие вторичные выводы печного трансформатора с жесткой неподвижной частью короткой сети, которые компенсируют изменения размеров проводников, возникающие при колебаниях их температуры;

2) шинный пакет, состоящий из прямоугольных шин или водоохлаждаемых труб, расположение которых обеспечивает максимальную компенсацию магнитного поля (проводники в пакете «шихтованы», то есть проводники со встречным направлением тока максимально сближены);

3) неподвижный башмак (узел расшихтовки, шинный мост) – для передачи тока от проводников шинного пакета к гибким проводникам;

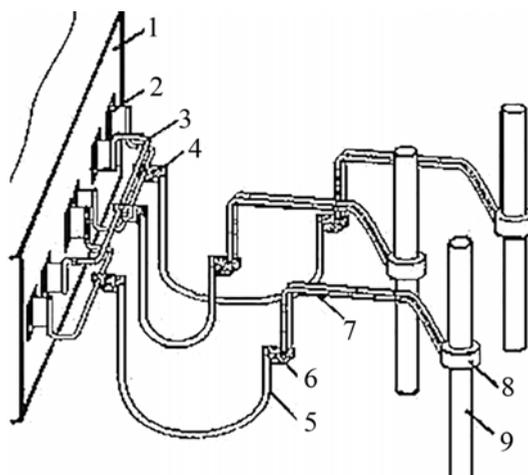
4) гибкие проводники (ленты или кабели, которые обычно охлаждаются водой) передают ток от неподвижного башмака к подвижному башмаку, перемещающемуся вертикально совместно с электрододержателем, а в печах с наклоняющейся ванной – перемещающемуся по дуге при наклоне печи для слива металла и шлака;

5) подвижный башмак, который передает ток от гибких кабелей к электрододержателю;

6) проводники и токведущие конструкции электрододержателя;

7) контактные щеки (плиты) или головки электрододержателей, которые передают ток от электрододержателя к электроду и обеспечивают его перепуск относительно конструкции электрододержателя;

8) электрод.



**Рис. 4.100. Короткая сеть ДСП:**

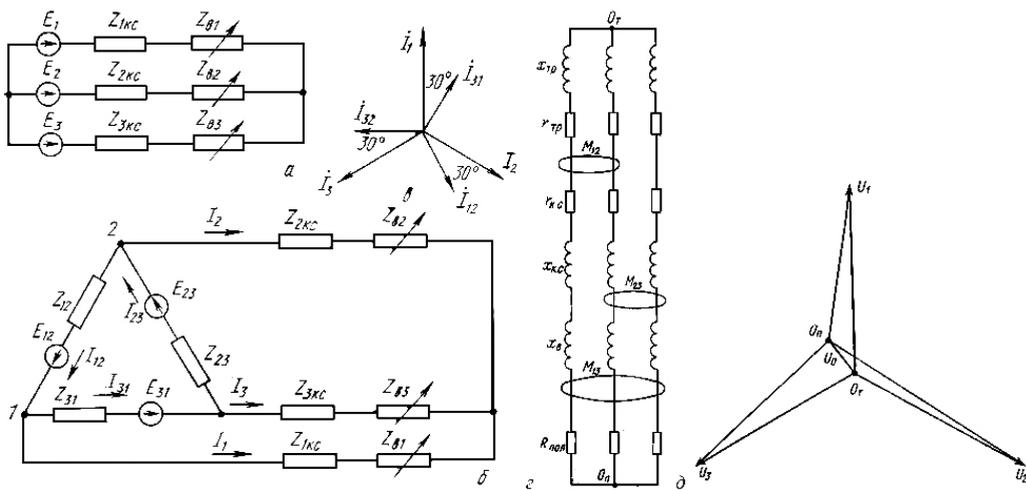
- 1 – выводы трансформатора; 2 – компенсаторы тепловых расширений;
- 3 – шинный мост; 4 – неподвижная контактная плита (башмак);
- 5 – гибкие кабели; 6 – подвижная контактная плита (башмак);
- 7 – сильноточные водоохлаждаемые трубошины;
- 8 – контактная щека и прижим электрода; 9 – электрод

Активные и особенно индуктивные сопротивления короткой сети оказывают определяющее влияние на электрические и технико-экономические характеристики электропечной установки: мощность, коэффициент мощности, КПД, удельный расход электроэнергии, производительность и т.д. Протекающие токи промышленной частоты по проводникам короткой сети создают вокруг них мощные переменные магнитные поля. Вследствие этого особое значение имеют такие явления, как поверхностный эффект, эффект близости, неравномерное распределение тока по параллельным проводникам, перенос мощности между отдельными проводниками и фазами, потери энергии в близлежащих металлоконструкциях и их нагрев.

Если в первом приближении не учитывать взаимные индуктивности, то при схеме замещения и векторная диаграмма для случаев соединения вторичных обмоток печного трансформатора по схеме «звезда» и «треугольник» можно представить, как на рис. 4.101, где  $E_{12}, E_{23}, E_{31}, E_{12}, E_{23}, E_{31}$  – э.д.с. обмоток трансформатора;  $Z_{12}, Z_{23}, Z_{31}, x_{тр}, r_{тр}$  – внутреннее сопротивление фаз трансформатора;  $Z_{1кc}, Z_{2кc}, Z_{3кc}, x_{кc}, r_{кc}$  – линейные сопротивления короткой сети;  $Z_{в1}, Z_{в2}, Z_{в3}, x_{в}, R_{пол}$  – сопротивления ванны под каждым электродом;  $I_{12}, I_{23}, I_{31}, I_1, I_2, I_3$  – фазные и линейные токи,  $U_1, U_2, U_3$  – фазные напряжения,  $U_0$  – напряжение сдвига нуля печи относительно нуля трансформатора.

Если привести схему «треугольник» к эквивалентной звезде и учесть взаимные индуктивности, то схема замещения приобретает вид, представленный на рис. 4.101 г. При несимметрии фаз короткой сети и/или активных (полезных) сопротивлений ванны между нулями ванны и трансформатора возникает напряжение смещения, показанное на векторной диаграмме напряжений (рис. 4.101 д). При этом фазные активная мощность ванны отличаются друг от друга. При возникающих в процессе плавки случайных изменениях фазных активных сопротивлений ванны возникающая несимметрия активных мощностей по электродам называется перекосом мощности и также имеет случайный характер.

Разное значение межфазных взаимных индуктивностей связано с пространственной несимметрией расположения проводников короткой сети и имеет систематический характер. Несимметрия взаимных индуктивностей между фазами приводит к переносу между фазами реактивных и активных мощностей и проявляется в виде несимметрии активных мощностей по электродам. Для средних и крупных печей несимметрия мощностей по электродам выражена настолько сильно, что приводит к ускоренному износу футеровки напротив так называемой **«дикой» фазы** и к замедлению плавки в районе другой фазы, называемой **«мертвой»**. Для устранения этого отрицательного явления короткая сеть должна быть выполнена максимально симметричной.



**Рис. 4.101. Схемы замещения печных установок при соединении вторичных обмоток трансформатора по схеме а – звезда, б – треугольник, в – векторная диаграмма токов, г – схема с взаимными индуктивностями, д – векторная диаграмма напряжений при смещении нуля печи**

Наибольшую несимметрию взаимных индуктивностей короткой сети ДСП имеют два из указанных выше участка: гибкие проводники и проводники электродержателей. Если проводники трех фаз на этих участках расположены в одной плоскости, конфигурацию токоподвода называют *копланарной*. При этом соседние фазы имеют примерно в два раза большую взаимную индуктивность, чем две крайних фазы. Такая конфигурация короткой сети резко несимметрична.

Другая, симметричная конфигурация короткой сети называется *триангулированной*. В этом случае проводники разных фаз в поперечном сечении расположены по вершинам равнобедренного или равностороннего треугольника. Равенство расстояния между всеми фазами в этом случае соблюдается лучше. При такой конструкции короткой сети явления «дикий» и «мертвой» фаз значительно ослаблены. Тем не менее отрицательное влияние взаимной индуктивности фаз на этом не заканчивается. Как будет показано ниже, взаимная индуктивность между фазами вносит неустойчивость в работу систем автоматического регулирования электрического режима печи.

Кардинально проблема перекоса и переноса мощности решена в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока (ДППТ). В ДППТ при одном сводовом электроде перекоса мощности не может возникнуть в принципе. Перенос мощности на постоянном токе также отсутствует. Для обеспечения симметричного распределения мощности в рабочем пространстве ДППТ необходимо обеспечить симметрию магнитного поля в зоне горения дуги. Эта задача решается выбором соответствующей конфигурации шинных пакетов короткой сети.

К коротким сетям руднотермических печей предъявляются те же требования, что и в ДСП. Наибольшей симметрии для трехэлектродных РТП с круглой ванной удастся достигнуть при схеме «треугольник на электродах», которая показана на рис. 4.102. При применении этой схемы создается небольшая асимметрия (перекос реактивных сопротивлений примерно 5% и полезных мощностей на 2,5%).

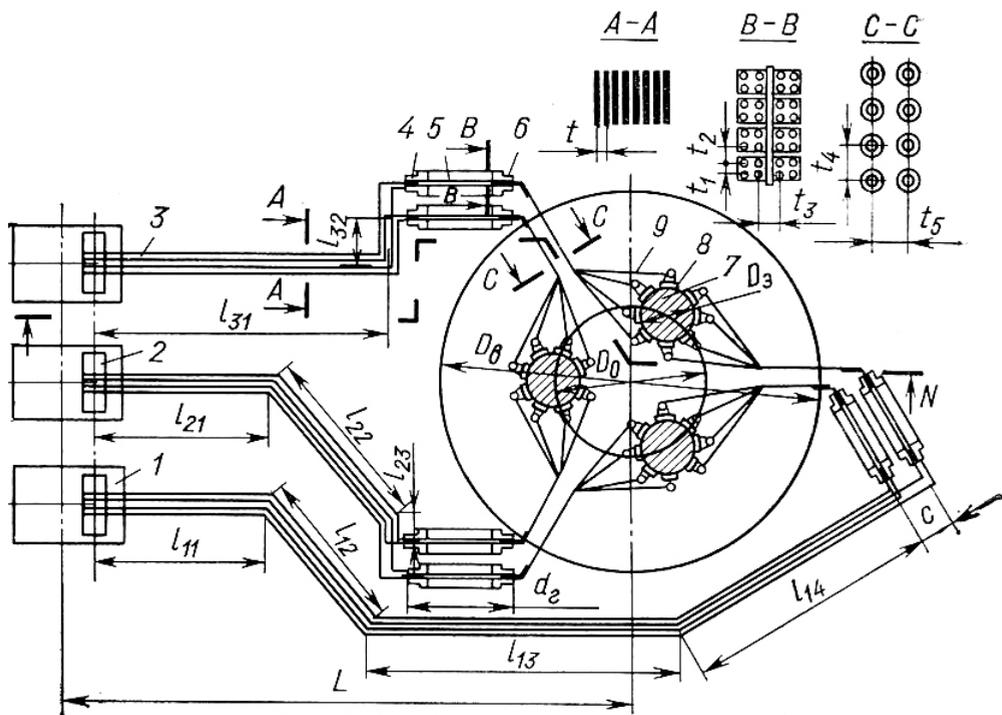


Рис.4.102. Схема короткой сети «треугольник на электродах» РТП с круглой ванной

В шестиэлектродных РТП с прямоугольной ванной используются однофазные трансформаторы, соединенные в трехфазную группу. Удовлетворительная симметрия короткой сети и минимизация индуктивного сопротивления достигнута в схеме, показанной на рис. 4.103.

В отличие от ДСП, в системе электроснабжения РТП отсутствует реактор, поскольку электрический режим более спокоен, дуги устойчивы. Печные трансформаторы, как правило, выполняются с переключением ступеней напряжения под нагрузкой.

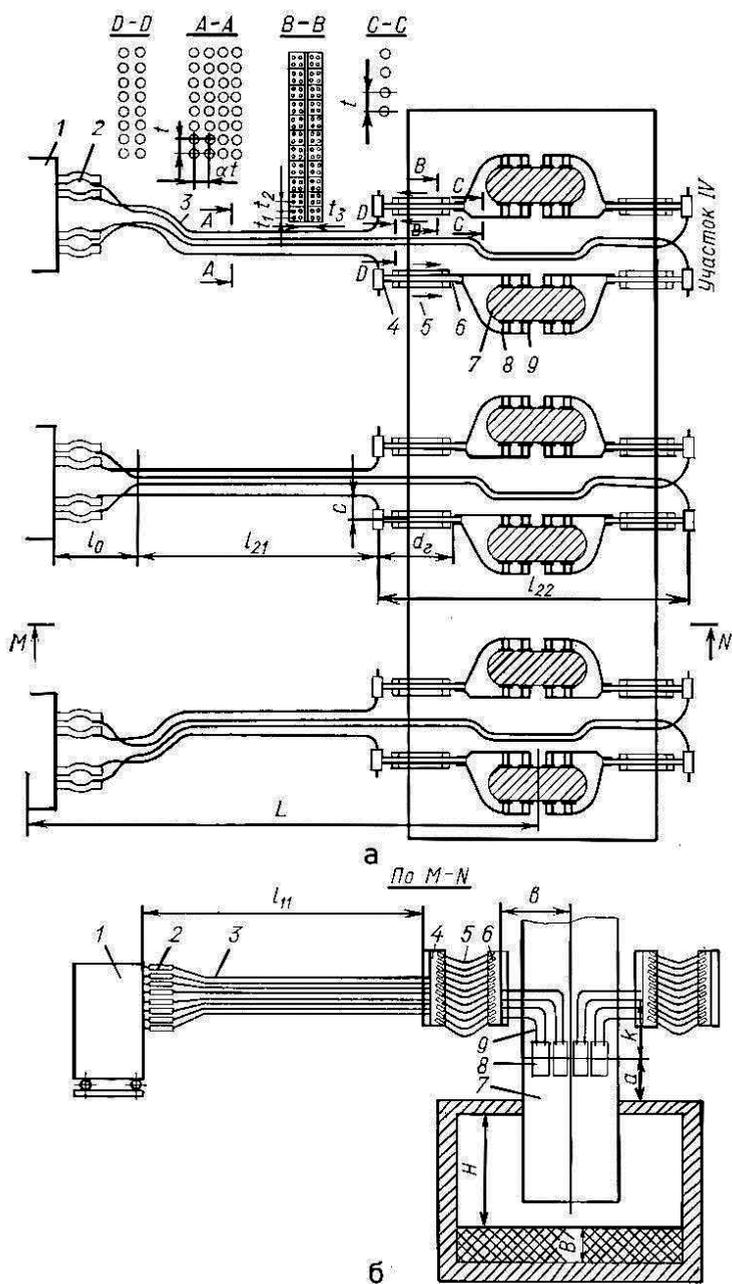


Рис. 4.103. Схема короткой сети шестиэлектродной РТП с прямоугольной ванной

Регулирование режима РТП осуществляется как перемещением электродов исполнительным электромеханическим или гидравлическим приводом, так и переключением ступеней напряжения трансформатора. Коэффициент мощности

РТП составляет 0,6–0,85, для его повышения и доведения до приемлемых значений (более 0,9) применяются схемы компенсации реактивной мощности с использованием конденсаторов, схемы питания печей постоянным током и током пониженной частоты.

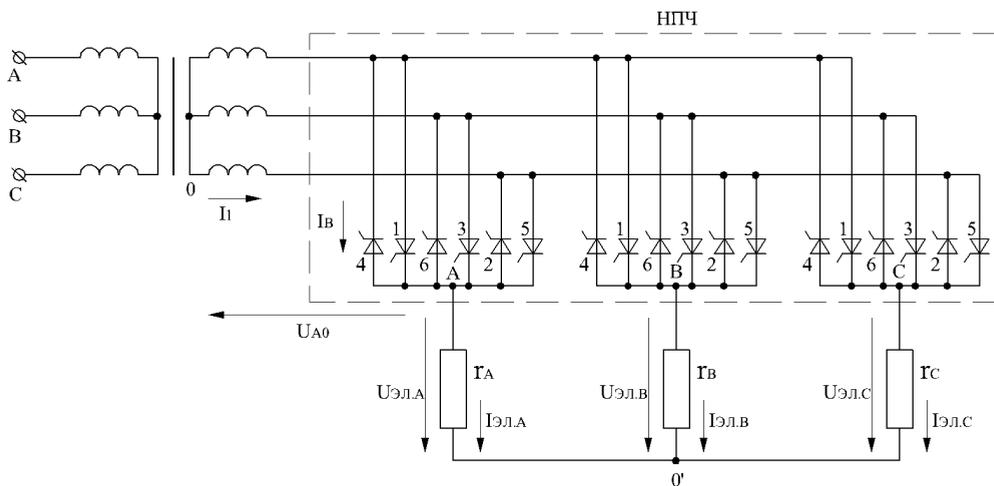
Для подвода постоянного тока питание в РТП выполняется проводящая подина (как правило, из углеродистых материалов). В отличие от многоэлектродных схем на переменном токе, в которых ток замыкается в ванне по кратчайшему расстоянию между электродами, в печах постоянного тока с проводящей подиной ток проходит через всю толщину ванны, что способствует интенсификации металлургических процессов. Для этого нижний токоподвод должен быть надежно подключен к проводящей подине без нарушения герметичности кожуха печи.

В РТП, питаемых током пониженной частоты (до 2 Гц), конструкция печи такая же, как и при использовании тока промышленной частоты. Питание трехэлектродной печи осуществляется от тиристорного непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) [18, 36], схема которого приведена на рис. 4.104 с управлением по прямоугольному закону [18].

Каждая из фаз НПЧ работает как реверсивный выпрямитель с нулевым углом управления. Между выключением группы тиристоров одной полярности и включением противоположной группы выдерживается пауза, необходимая для гарантированного запираания тиристоров, закончивших работу. Приведенная на рис. 4.104 схема питания РТП может быть использована как для вновь строящихся, так и для модернизации действующих печей, так как не требует внесения конструктивных изменений в саму печь. Тиристорный преобразователь частоты включается в разрыв короткой сети (после выводов низкого напряжения печных трансформаторов).

Использование тока пониженной частоты позволяет повысить коэффициент мощности, активную мощность и производительность РТП. Кроме того, улучшается использование поперечного сечения электродов по току, повышается качество спекания самоспекающихся электродов, обеспечивается электродинамическое перемешивание металлической ванны, что позволяет вовлекать в производство мелкодисперсные шихтовые материалы, создаются условия для раздельного по фазам регулирования напряжения на электродах, что позволяет поддерживать электроды в оптимальном положении.

Вакуумные дуговые печи, обычно питаются постоянным током прямой полярности: катодом служит расходимый электрод, а анодом – формируемый слиток. В связи с тем, что рабочее напряжение ВДП низкое (до 40 В), наиболее экономичны схемы выпрямления: «звезда-обратная звезда с уравнительным реактором» и кольцевая схемы.



**Рис. 4.104. Силовая схема трехэлектродного печного комплекса с непосредственным преобразователем частоты с трехфазным выходом**

В отдельных случаях, например, при плавке тугоплавких металлов для питания ВДП используют постоянный ток обратной полярности, реверсивный постоянный ток и переменный ток

Установки ЭШП, работающие на токе промышленной частоты, как правило, питаются от однофазных трансформаторов, имеющих большое количество ступеней напряжения, переключаемых под нагрузкой, чтобы обеспечить тонкую настройку режима переплава по ходу процесса. Трехфазные схемы питания ЭШП используются редко.

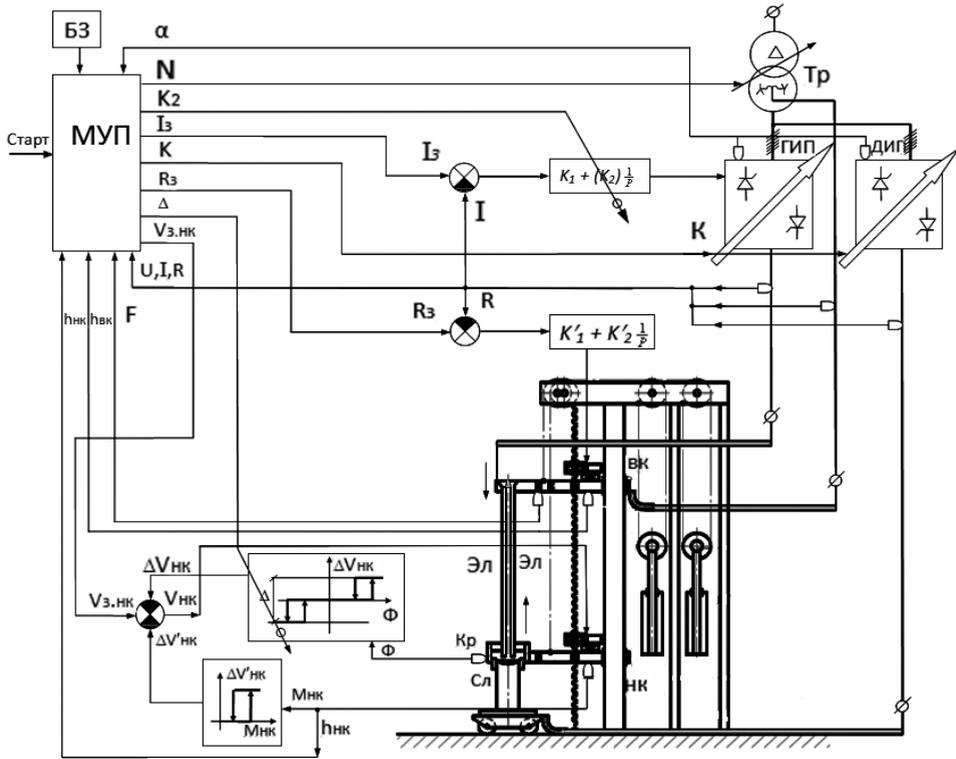
Установка ЭШП оснащается системой автоматического управления, обеспечивающей в течение основного квазистационарного периода плавки.

1. Поддержание постоянной величины заглублиения ( $h$ , на рис. 4.75) электрода в шлак и, соответственно, межэлектродного расстояния  $h$ . Заглублиение может составлять до 0,4–0,5 диаметра электрода. Правильный выбор межэлектродного расстояния обеспечивает отсутствие электрической дуги в шлаке и капельных коротких замыканий. Оптимальная форма жидкометаллической ванны и удовлетворительные энергетические соотношения в шлаке достигаются при оптимальном межэлектродном расстоянии, которое может составлять до 0,5 диаметра электрода. Этим размером определяется и необходимое количество шлака.

2. Поддержание постоянной массовой скорости наплавления слитка. Этим достигаются неизменная направленность фронта кристаллизации, необходимые условия всплывания примесей и т.п.

3. При плавке в коротком скользящем кристаллизаторе – поддержание требуемого уровня металлической ванны относительно кристаллизатора.

На рисунке 4.105 приведена функциональная схема управления электрошлаковым переплавом бифилярно соединенных расходуемых электродов на токе пониженной частоты.



**Рис. 4.105. Функциональная схема адаптивного управления ЭШП:**

(Тр – трансформатор; ГИП и ДИП – главный и дополнительный источники питания; ВК и НК – верхняя и нижняя каретки;

Эл – расходуемые электроды; Кр – кристаллизатор; БЗ – база знаний;

МУП – модель управления процессом; К – коммутация структуры источника питания;

$U, I, I_3, R, R_3$  – напряжение, текущее и заданное значения тока, текущее и заданное активное сопротивление печи;  $\alpha$  – угол фазового управления преобразователя;  $P_3$  – задание по мощности печи;  $K_2, \Delta$  – параметрическая адаптация регуляторов;  $N$  – регулирование номера ступени напряжения,

$V_{3, НК}$  – задание скорости нижней каретки;  $M_{НК}, h_{НК}$  – момент и перемещение нижней каретки;

$h_{ВК}$  – перемещение верхней каретки;  $\Phi$  – сигнал датчика уровня металлической ванны)

Источник питания состоит из главного источника (ГИП) и дополнительного источника питания (ДИП), которые запитаны от трансформатора (Тр). Силовая схема – «две звезды с уравнительным реактором». Два расходуемых электрода (Эл) соединены по бифилярной схеме на электрододержателе верхней каретки (ВК).

Нижние концы расходоуемых электродов погружены в ванну шлака, которым заполнена уширенная часть кристаллизатора (Кр). Кристаллизатор с помощью нижней каретки (НК) перемещается вверх и своей нижней частью формирует слиток (Сл), по мере кристаллизации металла жидкой ванны. По мере оплавления расходоуемых электродов верхняя каретка опускается. Верхняя и нижняя каретки перемещаются навстречу друг другу.

Управление перемещением верхней каретки осуществляется по сопротивлению шлаковой ванны ( $R_3$  -R) с помощью пропорционально-интегрального регулятора. Приводы перемещения кареток передают сигналы в модель управления процессом (МУП) по величине перемещений ( $h_{вк}$ ,  $h_{нк}$ ).

Сигнал управления скоростью нижней каретки  $V_{нк}$  вычисляется как разность определяемого в МУП задания  $V_{з.нк}$  и поправок  $\Delta V_{нк}$  и  $\Delta V'_{нк}$ . Поправка  $\Delta V_{нк}$  формируется по сигналу  $\Phi$  обратной связи от датчика уровня металлической ванны в кристаллизаторе. С помощью блока МУП происходит адаптация параметра  $\Delta$ , определяющего диапазон изменения поправки к скорости нижней каретки в зависимости от дисперсии момента в приводе ее перемещения.

Вторая поправка  $\Delta V'_{нк}$  формируется по сигналу  $M_{нк}$ , обратной связи от привода перемещения нижней каретки. Задача второй поправки – обеспечить резкое «продергивание» формируемого слитка в кристаллизаторе в случае критического нарастания момента в приводе перемещения нижней каретки.

#### 4.8. Выбор рационального режима работы ДСП

Для правильной эксплуатации дуговой сталеплавильной печи необходимо выбрать рациональные рабочие режимы, которым соответствуют определенные точки электрических и рабочих характеристик.

К электрическим характеристикам относят зависимости активной мощности печи  $P_{акт}$ , мощности дуги  $P_{д}$ , электрических потерь  $P_{эл}$ , электрического к.п.д.  $\eta_{эл}$ , коэффициента сдвига  $\cos\phi$  (для упрощения его принимают примерно равным коэффициенту мощности), напряжения на дуге  $U_{д}$ , от силы тока во вторичном контуре печи  $I_2$ .

К рабочим характеристикам относятся зависимости полного к.п.д.  $\eta$  удельного расхода электроэнергии за плавку  $W$ , удельной производительности печи  $g$ , времени расплавления  $\tau$  от силы тока.

На рисунке 4.106 приведены рабочие (вверху) и электрические (внизу) характеристики ДСП, построенные для периода расплавления (обозначения параметров даны выше). В остальных периодах работы печи, мощность, как правило, ниже номинальной и выбор режима диктуется в основном технологическими требованиями.

При упрощенных расчетах для построения рабочих характеристик величину тепловых потерь печи принимают не зависящей от тока и равные  $P_{т.п.} = 0,2 P_{max}$  от максимальной активной мощности печи. Уточненный расчет выполняют на основании энергетического баланса с учетом тепловых эффектов химических реакций и теплового расчета печи.

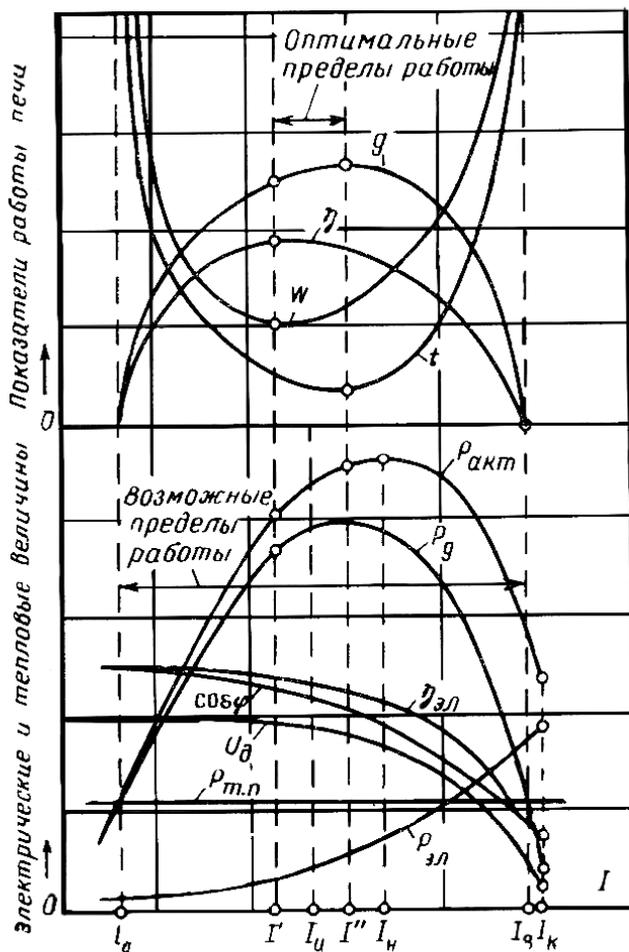


Рис. 4.106. Рабочие и электрические характеристики ДСП

Очевидно, печь может работать лишь тогда, когда сумма тепловых и электрических потерь не превышает активной мощности печи  $P_{акт}$ , т.е. диапазон возможных режимов работы ДСП несколько уже диапазона электрических характеристик. Диапазон же рациональных режимов значительно меньше диапазона возможных режимов работы. Действительно нет смысла работать левее точки минимального расхода электроэнергии, так как при этом увеличивается время

расплавления при уменьшении производительности и полного коэффициента полезного действия. Также нет смысла работать правее точки максимальной производительности, так как при этом снижается производительность и полный к.п.д. Следовательно, если определяющим является производительность печи, следует работать в режиме, соответствующем рабочему току  $I''$ . Если определяющим является расход электроэнергии – в режиме, соответствующем току  $I'$ .

При прочих условиях следует стремиться к минимальной себестоимости расплавления металла. Себестоимость расплавления одной тонны стали может быть рассчитана по формуле:

$$Ц = A + B/g + CW, \text{ руб./т.} \quad (4.87)$$

где  $A$  – независимая от рабочего тока составляющая себестоимости, например, стоимость шихты;  $B/g$  – составляющая себестоимости, находящаяся в обратно пропорциональной зависимости от производительности, например, учитывающая зарплату обслуживающего персонала, накладные цеховые расходы;  $CW$  – составляющая себестоимости, пропорциональная расходу электроэнергии, например, плата за нее.

Таким образом, минимуму себестоимости расплавления соответствует режим с рабочим током  $I_{ц}$ , лежащий между режимами минимального расхода электроэнергии и максимальной производительности. Соответственно, необходимо выбирать схему питания и электрооборудование и разработать конструкцию ДСП, обеспечивающие электрический режим ее работы в указанном диапазоне.

Использование ДСП переменного тока связано с рядом острых проблем, решению которых в последние уделяется большое внимание [15]. Выше перечислен ряд технических и технологических решений, которые позволили значительно продвинуться в решении проблем отрицательного влияния ДСП на питающую сеть, снижения затрат электроэнергии и расхода электродов, повышения экономических показателей и обеспечения высокого качества выплавляемой стали. Но одновременно растут требования к конструкции дуговых печей и их технико-экономическим показателям. В определяющей степени успехи в совершенствовании ДСП переменного тока обязаны развитию и широкому применению интенсивных кислородных технологий и использованию органического топлива, что приводит к усилению выбросов углекислого газа (так называемый углеродный след технологии) – т.е., достигнуты в ущерб экологическим характеристикам производства стали.

Выплавка стали в дуговых печах постоянного тока (ДППТ) по всем характеристикам не уступает, а по важнейшим из них превосходит показатели работы ДСП переменного тока. Время, когда внедрение в производство электростали

сдерживалось неуверенностью в надежности мощных выпрямителей давно прошло. Современная силовая преобразовательная техника широко и повсеместно используется в промышленности, включая сталеплавильные производства. Мощность преобразовательных устройств, используемых в установках ДСП, значительно превышает мощность выпрямителей, которыми оснащаются такие же по производительности ДППТ.

Приведем наглядный пример. На рисунке 4.93 показана схема электроснабжения ДСП-180. Печь питается от печного трансформатора мощностью 150 МВА. Мощность системы компенсации (СТК) составляет 360 Мвар (180 Мвар – ТРГ и 180 Мвар – фильтры). Итого установленная мощность системы питания печи составляет 510 МВА. Средняя активная мощность печи в период расплавления – 85 МВт. Коэффициент использования установленной мощности энергооборудования –  $85/510 = 0,17$  (17%).

При питании такой же печи постоянного тока от тиристорного выпрямителя, выполненного по 12-пульсной схеме, мощность трансформатора составила бы 100 МВА (при той же активной мощности). Требуемая мощность фильтрокомпенсирующего устройства составила бы около 40 Мвар. Суммарная мощность системы питания 140 МВА при коэффициенте использования –  $85/140 = 0,61$ , т.е. в 3,5 раза выше, чем на переменном токе. При этом наиболее дорогое оборудование: трансформатор будет на 1/3 меньше по мощности и проще по конструкции, тиристорный выпрямитель на 44% ( $(180-100)/180 = 0,44$ ) меньше по мощности и проще, чем быстродействующий тиристорный регулятор дросселя (ТРГ). Из сказанного следует, что ДСП в данном случае значительно уступает ДППТ по экономическим и техническим характеристикам.

Другой вопрос, который необходимо решить при использовании постоянного тока в ДППТ – это установка подовых электродов. Надежность, безопасность и эффективность их работы – это исключительно вопрос правильной конструкции подовых электродов и всего нижнего токоподвода, которая полностью отработана на протяжении более чем трех десятилетий промышленной эксплуатации. В мире успешно работают сотни дуговых сталеплавильных печей постоянного тока различного размера, включая самую крупную, вместимостью 420 т. В Российской Федерации наиболее крупная печь постоянного тока ДППТ-25 вместимостью 25 т.

Технологические преимущества ДППТ, рассмотренные выше в разделе 4.2, позволяют определить направление, в котором возможно снижение углеродного следа при производстве стали. Задачей дальнейшего развития направления дуговых печей постоянного тока является разработка технологии, позволяющей полнее реализовать энергетические и технологические возможности ДППТ при значительном сокращении и в пределе полном исключении использования углерода в качестве топлива.

#### 4.9. Типовые задачи, возникающие при расчете и проектировании установок дугового нагрева и электрошлакового переплава

**Задача 1.** Расчет электрических параметров дуговой сталеплавильной печи постоянного тока вместимостью 15 тонн ДППТ-15 для плавки металлического лома. Заданы: ток дуги  $I = 15\ 000$  А; длина дуги  $L = 0,3$  м; среднемассовая температура в печи  $T_m = 200^\circ\text{C}$ ; максимальная температура плавки  $T_{\max} = 1\ 650$  С.

Расчет напряжение сопротивления и мощности дуги.

$$T = T_m / T_{\max} = 0,121;$$

$$\alpha = 0,47 + 0,03 \cdot T^2 = 0,470;$$

$$B = 1,3 - T^2 = 1,285;$$

$$A = 3130 - 5650 \cdot T + 4565 \cdot T^2 - 1215 \cdot T^3 = 2\ 510;$$

$$U = 10 + B \cdot I^\alpha + A \cdot L \cdot I^{\alpha-0,5} = 695 \text{ В};$$

мощность дуги

$$P_d = U \times I = 10\ 428\ 000 \text{ Вт};$$

сопротивление дуги

$$R = U / I = 10 / I + B \cdot I^{\alpha-1} + A \cdot L \cdot I^{\alpha-1,5} = 0,04635 \text{ Ом};$$

градиент напряжения

$$dU/dL = E = A \cdot I^{\alpha-0,5} = 1\ 890 \text{ В/м.}$$

Наклон вольтамперной характеристики

$$\frac{\partial U}{\partial I} = \alpha \cdot I^{\alpha-1} \cdot \left[ B + \left( 1 - \frac{0,5}{\alpha} \right) \cdot \frac{A \cdot L}{I^{0,5}} \right] = 0,0026 \text{ В/А.}$$

Для изменения напряжения на дуге на  $\Delta U$  требуется электрод переместить на

$$\Delta L = \Delta U / A \cdot I^{\alpha-0,5} = \Delta U / 1880 \text{ м.}$$

**Задача 2. Рассчитать электрические параметры круглой рудовосстановительной печи мощностью 16500 кВА для выплавки 45%-ного ферросилиция.** Расчет проводим по методике ВНИИЭТО [37]. Эскиз ванны печи приведен на рис. 4.107.

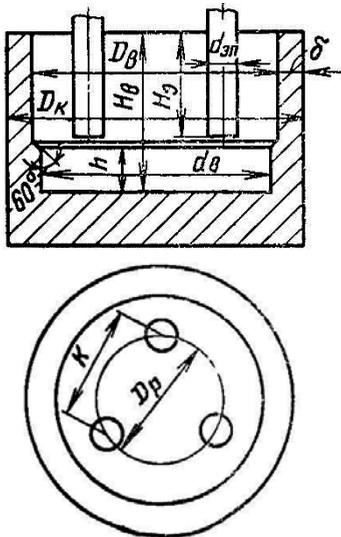


Рис. 4.107. Расчетный эскиз ванны круглой РТП

В соответствии с табл. 4.11 принимаем  $\eta_{эл} \cdot \cos \varphi = 0,72$ . Тогда полезная мощность печи (активная мощность, выделяющаяся в ванне печи и в зашихтованной части электрода)

$$P_{\text{пот}} = \eta_{эл} \cdot \cos \varphi \cdot S = 0,72 \cdot 16500 = 11900 \text{ кВт.}$$

Полезное напряжение

$$U_{\text{пот}} = c \cdot P_{\text{пол}}^n = 3,3 \cdot 11900^{0,33} = 75,5 \text{ В,}$$

где  $c$  и  $n$  – константы, значения которых для разных процессов даны в табл. 4.12.

Линейное напряжение

$$U_{\text{л}} = \frac{\sqrt{3} U_{\text{пол}}}{\eta_{эл} \cdot \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3} \cdot 75,5}{0,72} = 182 \text{ В.}$$

Рабочий ток в электроде

$$I_{\text{л.раб}} = \frac{P_{\text{пол}}}{3 \cdot U_{\text{пол}}} = \frac{11900}{3 \cdot 75,5} = 52500 \text{ А.}$$

### Расчетные значения произведения $\eta_{эл} \cdot \cos\phi$ для РТП непрерывного действия

Производимый продукт	Значение $\eta_{эл} \cdot \cos\phi$ при мощности печи, кВА									
	3 500–5 000	5 000–8 500	8 500–9 500	10 000–11 000	11 500–13 500	14 000–17 000	24 000	50 000		
Углеродистый, мало и безуглеродистый феррохром	0,50	0,80	0,80	0,74	0,70	0,67	0,64	–		
Передельный феррохром	0,86	0,80	0,80	0,79	0,78	0,75	0,73	–		
Силихром 50%	–	0,83	0,83	0,75	0,74	0,73	0,71	–		
Металлический марганец	0,86	0,84	0,84	–	–	–	–	–		
Марганцевый шлак	0,69	0,67	0,67	0,65	–	–	–	–		
Силикомарганец 82%	–	0,74	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	–		
Ферромарганец	0,80	0,76	0,76	0,74	0,72	0,68	0,65	–		
Электрокорунд	0,83	0,79	0,79	0,75	–	–	–	–		
Ферросилиций 45%	–	–	–	0,76	0,73	0,72	0,70	–		
Ферросилиций 75%	–	0,84	0,84	0,78	0,76	0,74	0,72	–		
Ферросилиций 90%	–	0,83	0,83	0,81	0,79	0,76	0,74	–		
Силикокальций	–	–	–	0,71	0,70	0,68	0,66	–		
Карбит кальция	–	–	–	0,76	0,73	0,72	0,70	–		
Медно-никелевый штейн	–	–	–	0,89	0,87	0,84	0,81	0,79		
Фосфор	–	–	–	0,96	0,95	0,93	0,91	0,87		

**Значения коэффициентов  $n$  и  $c$  для РТП  
непрерывного действия**

Производимый продукт	$P_{\text{пол}} = 13500 \text{ кВт}$		$P_{\text{пол}} = 13500 \text{ кВт}$	
	$n = 0,25$ $c^*$	$n = 0,33$ $c^{***}$	$n = 0,25$ $c'$	$n = 0,33$ $c''$
Силикомарганец	5,7	–	6,0	–
Ферросилиций 45%-ный	–	3,2	–	3,3
Ферросилиций 75%-ный	–	3,4	–	3,4
Ферромарганец углеродистый	5,3	–	5,4	–
Силикохром передельный	6,8	–	7,0	–
Феррохром передельный	7,6	–	7,9	–
Силикокальций	5,7	–	6,0	–
Фосфор	16,5	–	17,2	–
Электрокорунд	9,8	–	9,8	–
Медно-никелевый штейн	11,2	–	11,5	–
Карбид кальция	–	2,6	–	2,6
Рафинированный феррохром	17,0	–	–	–

$c^*$  – коэффициент для шлакового процесса,

$c^{***}$  – коэффициент для без шлакового процесса

Интервал линейных напряжений печного трансформатора  $\mp 20\%$  от  $U_{\text{л}}$  равен 146÷217 В.

Максимальный ток в электроде берется с 15%-ным запасом:

$$I_{\text{л.мах}} = \frac{I_{\text{л.раб}}}{0,85} = 61\,800 \text{ А}.$$

Активное сопротивление ванны

$$R_{\text{в}} = \frac{U_{\text{пол}}}{I_{\text{л.раб}}} = 1,44 \text{ мОм}.$$

Диаметр самоспекающегося электрода

$$d_{\text{эл}} = \frac{\text{ЭП}_1}{R_{\text{в}}} = \frac{1,6}{1,44 \cdot 10^{-3}} = 1\,120 \text{ мм},$$

где  $\text{ЭП}_1 = 1,6$  – критерий электрического подобия, принимаемый в соответствии с табл. 4.13. Принимаем ближайший стандартный размер  $d_{\text{эл}} = 1\,200 \text{ мм}$ .

Значения коэффициента ЭП<sub>1</sub>\* для РТП

Производимый продукт	ЭП <sub>1</sub> *
Фосфор	4,90–5,80
Ферросилиций 45-процентный	1,50–2,00
Ферросилиций 75-процентный	1,60–2,03
Силикохром 50-процентный	1,50–1,72
Силикомарганец	1,34–1,41
Ферромарганец	1,54
Медный штейн	1,40–1,50

Максимальная плотность тока в электроде меньше предельно допустимой (табл. 4.14):

$$j = \frac{4 \cdot I_{л.макс}}{\pi \cdot d_{эл}^2} = 5,46 \text{ А/см}^2 < 7,0 \text{ А/см}^2 .$$

Реактивное сопротивление печного контура и активное сопротивления короткой сети оценим с помощью данных табл. 4.15:  $x = 1,0 \text{ МОм}$ ;  $r_{к.с.} = 0,20 \text{ м Ом}$ .

К.п.д. и коэффициент сдвига составят:

$$\eta_{эл} = \frac{R_B}{R_B + r_{к.с.}} = 0,88,$$

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left( \frac{\sqrt{3} \cdot I_{л.раб}}{U_{л.}} x \right)^2} = \sqrt{1 - \left( \frac{1,73 \cdot 52500}{182} 1,0 \cdot 10^{-3} \right)^2} = 0,867.$$

Уточненное значение  $\eta_{эл} \cdot \cos \varphi = 0,76$  отличается на 5% от исходного значения, следовательно, повторного расчета не требуется.

## Допустимые значения плотности тока в самоспекающемся электроде

Допустимые значения тока в самоспекающемся электроде	
Производимый продукт	$I_{доп}, \text{ а/см}^2$
Ферросилиций 45%-ный	До 7,0
Ферросилиций 75%-ный	До 7,0
Фосфор	До 4,5
Силикохром 50%-ный	До 7,0
Силикомарганец	До 6,2
Ферромарганец	До 7,6
Медный штейн	До 4,0
Электрокорунд	До 4,0
Карбид кальция	До 6,8
Силикокальций	До 12,0

### Электрические параметры вторичного токоподвода РТП

Мощность печи, кВА	2 000–2 500	3 500–4 000	4 500–8 000	8 500–10 000	11 000–13 500
$x, \text{ом} \cdot 10^{-3}$	1,70–1,80	1,50–1,65	1,35–1,45	1,25–1,30	1,10–1,22
$r_{к.с}, \text{ом} \cdot 10^{-3}$	0,40	0,35	0,28	0,22	0,21
Мощность печи, кВА	14 000–17 000		24 000	60 000	
$x, \text{ом} \cdot 10^{-3}$	0,96–1,02		0,90–0,94	0,83	
$r_{к.с}, \text{ом} \cdot 10^{-3}$	0,20		0,17	0,14	

**Задача 3. Определение основных геометрических и электрических параметров электрошлаковой печи для выплавки никелевых сплавов с глухим кристаллизатором и одним расходуемым электродом круглого сечения, выполненной по монофилярной схеме. Задан диаметр получаемого слитка 0,3 м.**

Определим основные геометрические размеры, указанные на рис. 4.75.

Длина слитка

$$L_{\text{сл}} = \frac{D}{K_{\text{сл}}} = \frac{0,3}{0,42} = 0,72, \text{ где } K_{\text{сл}} = 0,42 - \text{коэффициент формы слитка}$$

(обычно  $0,2 \div 0,5$ ).

Масса слитка

$$M = \frac{D^3 v \cdot \gamma}{K_{\text{сл}}} = \frac{0,3^3 \cdot 0,786 \cdot 8,4}{0,42} = 0,424 \text{ т,}$$

где  $v = \frac{S_{\text{сл}}}{D^2}$  – коэффициент формы слитка (для круглого слитка 0,786),

$\gamma = 8,4 \text{ т/м}^3$  – плотность.

Диаметр расходуемого электрода

$d = K_3 \cdot D = 0,2 \text{ м, где } K_3 = 0,67$  – линейный коэффициент заполнения по слитку (обычно  $0,6 \div 0,85$ ).

Зазор  $f$  между электродом и стенкой кристаллизатора соответствует условию:

$$f' = f/D = (0,15 \div 0,35) = 0,2.$$

Оптимальное расстояние  $h$  от нижнего торца электрода до поверхности металлической ванны примем:

$$h_{\text{онт}} \cong 0,5D_{\text{эл}} = 100 \text{ мм.}$$

Заглубление электрода в шлаковую ванну примем  $h_{\text{эл}} = 0,2d = 40 \text{ мм.}$

Глубина шлаковой ванны

$$l_{\text{ш}} = h_{\text{эл}} + h = 140 \text{ мм.}$$

Основной рабочей характеристикой ЭШП является скорость переплава. Оптимальная массовая скорость наплавления слитка  $G$  в зависимости от химического состава металла и диаметра слитка определяется согласно выражению

$$G = \frac{M_1}{K_{\text{фр}}} \cdot D = \frac{12,5}{2,7} \cdot 0,3 = 1,4 \text{ кг/мин,}$$

где  $M_1 = \frac{(12,5 - 20) \text{ кг}}{\text{мин} \cdot \text{м}}$  – показатель скорости плавки, определяемый химическим составом металла;

$$K_{\text{фр}} = tg \infty = \frac{D}{2h_{\text{к.м}}} = 2,7 \text{ – коэффициент формы фронта кристаллизации}$$

(для  $\alpha = 70^\circ$ ),

$h_{\text{к.м}}$  – глубина конической части металлической ванны.

Линейная скорость наплавления слитка

$$V_{\text{н}} = \frac{G}{\gamma \cdot S_{\text{сл}}} = \frac{4 \cdot 1,4}{8400 \cdot \pi \cdot 0,3^2} = 0,0024 \text{ м/мин.}$$

Скорость оплавления электрода составляет:

$$V_{\text{пл.э}} = \frac{V_{\text{н}}}{K_3^2} = \frac{0,0024}{0,67^2} = 0,0053 \text{ мм/мин.}$$

Определим основные электрические параметры. Если определены требования к качеству металла и скорость наплавления слитка, то мощность шлаковой ванны, в зависимости от применяемой марки шлака, равна

$$P_{\text{ш}} = \frac{G}{\alpha^{(m)}} = \frac{1,4}{8,3 \cdot 10^{-3}} = 0,17 \cdot 10^3 \text{ Вт,}$$

где  $\alpha^{(m)}$  – энергетический коэффициент шлаковой ванны, который зависит от числа  $m$  электродов печи

(для одноэлектродной печи  $\alpha^{(1)} = 8,3 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{мин}} \cdot 10^{-3}$ ).

Критериальное сопротивление  $\Gamma$  шлаковой ванны, определяемое конфигурацией электрического поля в шлаковой ванне и практически независимое от химического состава шлака, определяется выражением

$$\Gamma = \frac{0,20}{d^*} \cdot \left( \frac{h}{h_{\text{эл}}} \right)^{\alpha_R} \cdot f_{\phi} = \frac{0,20}{1,43} \cdot \left( \frac{100}{40} \right)^{0,228} \cdot 1,6 = 0,276,$$

где  $d^* = \frac{d}{l_{\text{ш}}} = \frac{200}{140} = 1,43$ ;

$$\alpha_R = 0,237 - 0,024 \cdot \ln d^* = 0,228;$$

$$f_{\phi} = (0,14 \cdot D_{\text{эл}}^* + 1,08) \cdot \left( \frac{h}{h_{\text{эл}}} \right)^{\alpha_1} = (0,14 \cdot 1,43 + 1,08) \cdot \left( \frac{100}{20} \right)^{0,139} =$$

$= 1,28 \cdot 1,251 = 1,6$  функция, зависящая от формы конца электрода. Когда его форма близка к полуэллипсоиду  $f_{\phi} = 1$ ;

$\alpha_1 = 0,113 + 0,074 \cdot \ln D_{\text{эл}}^* = 0,113 + 0,074 \cdot \ln 1,43 = 0,139$  для плавящегося металлического электрода.

Сопротивление одноэлектродной печи ( $m = 1$ ), рассчитанное по формуле

$$R_{\text{ш}}^{(1)} = \frac{\Gamma}{\gamma_{\text{ш}} \cdot d} = \frac{0,276}{220 \cdot 0,2} = 0,0063 \text{ Ом},$$

где  $\gamma_{\text{ш}} = 220 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  – удельная электропроводность шлака АНФ-6.

Ток и активная составляющая вторичного напряжения трансформатора (без учета потерь в токоподводе и электроде):

$$I_{\text{ИП.ср.}} = \sqrt{P_{\text{ш}} / R_{\text{ш}}^{(1)}} = \sqrt{170\,000 / 0,0063} = 5\,200 \text{ А},$$

$$U_{\text{ИП.ср.}} = \frac{P_{\text{ИП.ср.}}}{I_{\text{ИП.ср.}}} = \frac{170\,000}{5\,200} = 33 \text{ В}.$$

Если принять  $\cos \phi = 0,7$ , то и напряжение короткого замыкания трансформатора  $e_k = 10\%$ , то напряжение холостого хода на рабочей ступени напряжения трансформатора

$$U_{\text{тр.}} = \frac{33}{0,7 \cdot 0,9} = 52 \text{ В}.$$

**Задача 4.** Однофазная активно-индуктивная линейная нагрузка с коэффициентом сдвига  $\cos\varphi = 0,8$  (электрошлаковая печь, выполненная по бифазной схеме) с активной мощностью  $P_1$  включена на линейное напряжение  $U_{AB}$  к трехфазной сети без нулевого провода с синусоидальным напряжением. Определить энергетические коэффициенты и предложить меры по повышению энергетических показателей данного электропотребителя.

Линейный ток печи равен

$$I_A = I_B = I_1 = \frac{P_1}{\cos\varphi \cdot U_{AB}}.$$

Полная мощность согласно (4.79):

$$S_1 = U_{AB} \sqrt{I_A^2 + I_B^2} = \sqrt{2} U_{AB} I_1.$$

Коэффициент мощности согласно (4.85):

$$\alpha_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos\varphi \cdot k_n \cdot k_n = \frac{I_1 \cdot U_{AB} \cdot \cos\varphi}{\sqrt{2} U_{AB} \cdot I_1} = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \cos\varphi = 0,566.$$

Поскольку нагрузка линейная, то коэффициент искажения  $k_n = 1$ . Коэффициент несимметрии равен

$$k_n = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707.$$

Для повышения коэффициента мощности предпочтительно использовать трехфазную ЭШП с той же активной мощностью. При условии, что коэффициент сдвига трехфазной печи будет таким же, как у однофазной ЭШП, а линейные токи фаз будут одинаковыми по действующему значению, линейный ток определим из соотношения:

$$P_1 = P_3 = \sqrt{3} U_{AB} \cdot I_3 \cdot \cos\varphi;$$

$$I_3 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{AB} \cdot \cos\varphi}.$$

Полная мощность трехфазной ЭШП:

$$S_3 = \frac{\sqrt{3} U_{AB} \cdot P_1}{\sqrt{3} U_{AB} \cdot \cos\varphi} = \frac{P_1}{\cos\varphi}.$$

Коэффициент несимметрии трехфазной печи  $k_n = 1$ , а коэффициент мощности будет равен

$$\alpha_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos\varphi = 0,8.$$

## Контрольные вопросы и задания

1. Какова область применения дуговых печей?
2. Дайте классификацию дуговых электрических печей.
3. Расскажите о процессах ионизации и деионизации в дуговом разрядном промежутке. Что такое степень ионизации?
4. Процессы электронной эмиссии и плотность тока эмиссии.
5. Каковы свойства газоразрядной плазмы и их зависимость от параметров и состава газа?
6. Каковы температура и плотность тока на рабочем торце графитированного электрода, служащего катодом электрической дуги?
7. Расскажите о мощности и удельном тепловом потоке, поступающем на анод электрической дуги постоянного тока.
8. Каковы особенности горения электрической дуги на переменном и постоянном токе?
9. Расскажите о распределении мощности в рабочем пространстве печи, передаваемой излучением дуги.
10. Перемешивание жидкой металлической ванны в дуговых сталеплавильных печах.
11. Назначение ДСП и технологический процесс выплавки стали.
12. Электрооборудование и конструктивные элементы ДСП.
13. Основные элементы короткой сети ДСП?
14. Какие требования предъявляются к короткой сети ДСП.
15. Перенос и перекоп мощности, явление «дикой» и «мертвой» фазы. Каковы способы уменьшения переноса мощности?
16. Назовите методы регулирования мощности дуговой нагрузки.
17. Показатели качества электрической энергии в сети питания ДСП и их связь с режимом печи.
18. Полная мощность и ее составляющие, коэффициент мощности и другие энергетические коэффициенты как показатели энергетического совершенства дуговой печи.
19. Средства интенсификации плавки в ДСП, агрегаты ковш-печь.
20. Перечислите электрические характеристики дуговых сталеплавильных печей.
21. Рабочие характеристики дуговых сталеплавильных печей.
22. Расскажите о энергетических параметрах дуговых печей.
23. Электроснабжение ДСП. Каковы основные требования, предъявляемые к качеству электроэнергии? Оборудование, обеспечивающее их выполнение.
24. Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока. Их особенности и преимущества по сравнению с печами переменного тока.
25. Расскажите о назначении и классификации руднотермических печей.

26. Как распределяется мощность в ванне руднотермической печи переменного и постоянного тока?
27. Расскажите о принципе действия, векторной диаграмме и электрических характеристиках РТП с установками продольноемкостной компенсации.
28. Короткие сети РТП при питании их токами промышленной и пониженной частоты, постоянным током.
29. Каково назначение вакуумных дуговых печей и технологический процесс в ВДП?
30. График электрического режима ВДП, их электрические и регулировочные характеристики.
31. Расскажите о назначении печей электрошлакового переплава и электрошлаковых технологических процессах.
32. Конструктивные, технологические и электрические схемы печей ЭШП.
33. Расскажите о ДСП, ДППТ, РТП и ЭШП как потребителях электрической энергии.
34. Расскажите о электротехническом, энергетическом оборудовании и автоматике ДСП, РТП, ВДП и ЭШП.

#### **Список рекомендуемой литературы к главе 4**

1. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др. – М.: Энергоиздат, 1981.
2. Бортничук, Н.И. Плазменно-дуговые плавильные печи / Н.И. Бортничук, М.М. Крутянский. – М.: Энергоиздат, 1981г.
3. Bowman, B. Arc Furnace Physics/Verlag Stahleisen / B. Bowman, K. Krüger. – GmbH, Düsseldorf, 2009.
4. Крутянский, М.М. Параметры столба электрической дуги в безграничном потоке га-за // Труды IV Всесоюзной конференции по физике и генераторам низкотемпературной плазмы / М.М. Крутянский. – Алма-Ата, 1970 г.
5. Финкельнбург, В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельнбург, Г. Меккер. – М.: ИИЛ, 1961.
6. Попов, А.Н. Электродуговые печи постоянного тока // Электromеталлургия / А.Н. Попов, М.М. Крутянский, В.В. Долгов и др. – 1998. – №2. – С.11–15.
7. Шоек, П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена / П.А. Шоек. М.; Л.: Энергия, 1966. – С. 110–139.
8. Миронов, Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках / Ю.М. Миронов. – Чебоксары: Чувашский ун-т, 2014.

9. Спелицин, Р.И. Исследование заглублиения электрической дуги в условиях высокомоощных дуговых сталеплавильных печей // Электротермия / Р.И. Спелицин. – 1975. – Вып. 121 (160).
10. Mayr, O. Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens / O. Mayr // Archive für Elektrotechnik. – 1943. – 37, Heft 12. – S. 588–608.
11. Сидорец, В.Н. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой / В.Н. Сидорец, И.В. Пентегов. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013.
12. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмоощной дуговой сталеплавильной печи: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Николаев. –Магнитогорск, 2009.
13. Корнилов, Г.П. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Энергетика и теплоэнергетика металлургической отрасли. – 2013. – № 1. – С. 76–82.
14. Миронов, Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: монография/ Ю.М. Миронов. – Чебоксары: изд-во Чувашского ун-та, 2013.
15. Тулуевский, И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография / И.Ю. Тулуевский, И.Ю. Зинуров. – Новосибирск, НГТУ, 2010.
16. Макаров, А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров. – М.: Лань, 2014.
17. Основные закономерности распределения моощности по ванне многошлаковой рудовосстановительной печи / Ю.М. Миронов, В.А. Тарасов, В.Л. Розенберг и др. // Специальные вопросы электротермии. – Вып. 6. – Чебоксары, ЧГУ, 1997. – С. 14–24.
18. Нехамин, С.М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: автореф. ... дисс. докт. техн. наук / С.М. Нехамин. – М.: МЭИ, 2015.
19. Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкой стали в дуговой печи постоянного тока / С.А. Смирнов, В.В. Калаев, С.М. Нехамин [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – № 1. – С. 74 – 83.
20. Бояревич, В.В. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова и др. – Рига: Зинатне, 1985.
21. Чудновский, А.Ю. К оценке интенсивности одного класса осесимметричных электровихревых течений / А.Ю. Чудновский // Магнитная гидродинамика, 1989. №3. – С. 138–139.

22. Кацевич, Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей / Л.С. Кацевич. – М.: Энергия, 1977.
23. ASIE: Making, shaping, and treating of steel. –1998.
24. Сравнительные показатели дуговых сталеплавильных печей постоянного и переменного тока для литейного производства / К.А. Елизаров, М.М. Крутянский, С.М. Нехамин // Электromеталлургия. – 2011. – №1. – С.9–15.
25. Крутянский, М.М. Плавка алюминиевых сплавов в электродуговых печах постоянного тока: технические параметры и технологические возможности / М.М. Крутянский, С.М. Нехамин, М.В. Митрофанов // Технология легких сплавов. – 2018. – № 4. – С. 72–80.
26. Патент № 2664076. Электродуговая печь для переработки материалов, установка для электродуговой переработки материалов и способ работы установки / С.М. Нехамин, А.Н. Серегин, Д.В. Маслов и др. – 2018. Бюл. № 23.
27. Гудим, Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технологии, материалы / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, Л.Д. Киселев // Новосибирск: НГТУ, 2010.
28. Лопухов, Г.А. Передовой опыт сталеплавильного производства / Г.А. Лопухов // Электromеталлургия. – 1999. – № 8. – С. 3–40.
29. Волохонский, Л.А. Вакуумные дуговые печи / Л.А. Волохонский. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
30. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи. Ч. 2. Дуговые печи: учеб. пособие / А.Д. Свенчанский, М.Я. Смелянский. – М.: Энергия, 1970.
31. Миронов, Ю.М. Электрошлаковые печи / Ю.М. Миронов. – Чебоксары: Чувашский государственный университет, 1987.
32. ГОСТ 32144–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.
33. Кирпаковский, С.Е. Обоснование теории полной мощности многофазной цепи / С.Е. Кирпаковский // Изв. вузов. Энергетика. – 1959. – № 2. – С. 30 – 41.
34. Данцис, Я.Б. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий / Я.Б. Данцис, Г.М. Жилов. – Л.: Энергия, 1980.
35. Якимов, И.А. Улучшение энергетических показателей сверхмощных дуговых сталеплавильных печей за счёт тиристорного регулирования напряжения электропечных трансформаторов: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Якимов. – Магнитогорск, 2017.
36. Быков, Ю.М. Непосредственные преобразователи частоты с автономным источником энергии / Ю.М. Быков. – М.: Энергия, 1977.
37. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры / под общ. ред. Л.Е. Никольского; Л.Е. Никольский, Н.И. Бортничук, Л.А. Волохонский и др. – М.: Энергия, 1971.

## ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

### 5.1. Общие понятия нагрева плазмой при использовании электрической дуги

Как уже говорилось выше (см. главу 4) плазма – это ионизированный газ, содержащий ионы, электроны, атомы и нейтральные частицы. Природа её зависит от электрического разряда – совокупности всех физических и химических явлений при протекании тока через газообразную среду. Для возникновения и поддержания электрического разряда в газе необходимо, чтобы в газе непрерывно образовывались носители тока – свободные электроны и ионы. Если электрическая проводимость газа целиком обусловлена действием внешнего ионизатора, то газовый разряд называется *несамостоятельным*, если же электрический разряд продолжает существовать после удаления всех внешних ионизаторов, то такой разряд называется *самостоятельным*.

Слово «плазма» происходит от греческого *πλάσμα* («вылепленное», «оформленное»). Уже в мифах древней Греции встречаются упоминания об этом состоянии вещества. В XIX и XX вв. ученые всего мира старались изучить и объяснить природу процессов, протекающих в плазме. Например, в 1879 г. английский ученый Уильям Крукс при исследовании электрических явлений в разряженных газах сделал ряд предположений, связанных с природой плазмы и выделил виды плазмы. В современную физику [1] термин «плазма» ввели в 1929 г. американские ученые Ирвинг Ленгмюр и Леви Тонкс, когда проводили зондовые измерения низкотемпературной газоразрядной плазмы. В 50-х гг. прошлого века возрос интерес к процессам, протекающим в плазме, что было связано с исследованиями явлений при повышенных температурах, потребностями техники в новых технологических процессах, а также с задачами освоения космического пространства. Для получения локальных потоков низкотемпературной плазмы используют так называемые преобразователи энергии, основной задачей которых является преобразование электрической энергии в тепловую. Большинство газов переходит в плазменное состояние при температурах выше  $(2,5-3) \cdot 10^3$  К, когда степень ионизации их становится достаточной для протекания электрического тока. В 1958 г. И.Д. Кудинов и А.В. Николаев разработали и испытали один из первых преобразователей энергии и получили авторские свидетельства на способ создания высокотемпературного газового потока и конструктивное решение для его реализации [2, 3]. В настоящее время для получения низкотемпературной плазмы используются аппараты, использующие высокочастотный и сверхвысокочастотный [4, 5] и дуговой [6–8] разряды. Такие аппараты получили название

*плазмотроны*. В данной работе из-за недостатка места мы ограничимся рассмотрением лишь дуговых плазмотронов, при этом, поскольку протекающие в дуге процессы рассматривались выше (см. гл. 4), остановимся лишь на их особенностях.

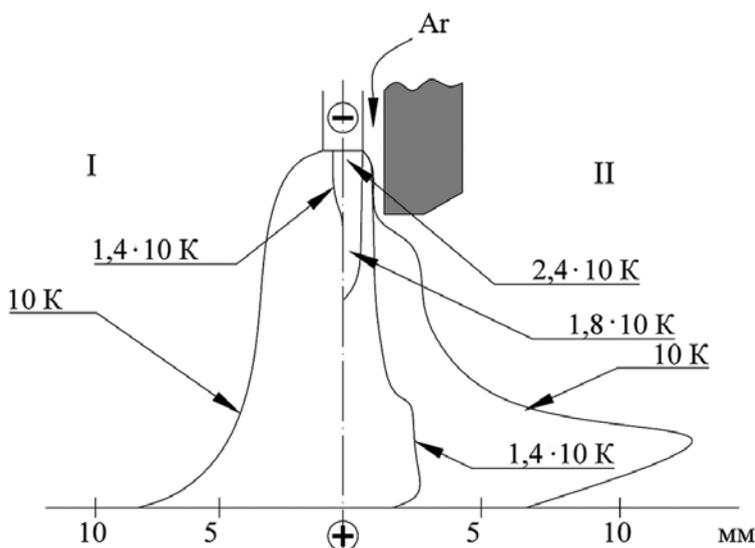
В электротермии используются дуги низкого и высокого (атмосферного) давлений, характеристики которых существенно различаются, что в значительной мере определяет различие в интерпретации процессов в них. Мы ограничимся дугами высокого давления.

Основной особенностью дуги высокого давления является развитый протяженный столб, который практически полностью заполняет межэлектродное пространство, за исключением двух узких пограничных слоев между столбом дуги и электродами. Толщины этих пограничных слоев вблизи поверхности электродов равны нескольким средним длинам свободного пробега электронов. Столб дуги атмосферного давления состоит из термической плазмы, для которой характерно почти полное термическое равновесие. Именно столб дуги является в электротермических установках атмосферного давления основным источником нагрева, тепловая энергия от которого передается нагреваемому изделию путем сложной теплопередачи: излучением, конвекцией и теплопроводностью.

Электрическая дуга в электротермических установках (ЭТУ) горит в потоке газа, омывающем столб дуги. Поток газа в дуговых ЭТУ формируется либо в результате свободной конвекции в рабочем объеме установки, например, в дуговых сталеплавильных печах, либо в результате формирования организованного (вынужденного) потока газа, например, в плазменных дуговых установках, с принудительным обдувом дуги.

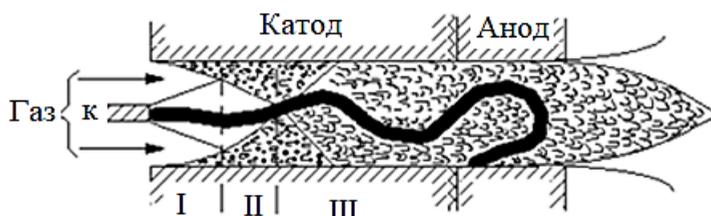
Как в условиях свободной конвекции, так и при принудительной подаче газа течение газа, омывающего дугу в ЭТУ, в основном турбулентное. Вынужденный режим охлаждения дуги потоком газа в плазменных установках позволяет интенсифицировать процесс дугового нагрева благодаря значительному возрастанию температуры плазмы даже при умеренном токе (см. рис. 5.1). В данном случае отличие между различными видами плазменных установок заключается только в принципах организации процессов теплообмена между дугой и турбулентным потоком газа, омывающим дугу, а также теплообмена между дугой и нагреваемым материалом.

В установках данного типа могут быть применены два принципа нагрева: с вынесенной дугой и с внутренней дугой. В первом случае нагреваемое изделие является одним из электродов дуги, обычно анодом. На таком принципе построены конструкции нагревателей плазменно-дуговых печей и плазменных горелок. Во втором случае с внутренней дугой нагреваемым элементом является сам поток газа, омывающий принудительно столб дуги. Такие дуговые установки, предназначенные для нагрева потока газа с целью получения высокотемпературной струи, называются струйными плазмотронами. Дуга в струйных плазмотронах горит внутри плазмотрона между электродами, которые являются элементами конструкции.



**Рис. 5.1. Температурное поле дуги, омываемой потоком газа:**  
 I – свободно конвективное; II – вынужденное

В промышленности в основном получили применение дуговые струйные плазмотроны с продольным принудительным обдувом дуги (рис. 5.2), конструктивные решения которых рассмотрены ниже.



**Рис. 5.2. Схема струйного плазмотрона с внутренней дугой:**  
 I – область дуги с потоком ламинарного газа;  
 II – область с переходным потоком газа;  
 III – область с турбулентным потоком газа

Характеристики дуги в условиях теплообмена дуги с нагреваемым материалом в значительной мере зависят от того, в какой газовой или паровой среде горит дуга; в каких условиях это происходит: либо свободная конвекция, либо используется принудительный поток газа; вынесена ли дуга на электрод-изделие или горит внутри плазмотрона, предназначенного для получения плазменной струи. Типичными дугами в электротехнологических установках атмосферного давления являются следующие.

1. *Свободноконвективные дуги в смеси воздуха и углекислого газа, электрод графитовый* (дуговые сталеплавильные печи переменного тока (ДСП)). Мощность дуги зависит от металлургической емкости ванны и типа конструкции печи и лежит в пределах от 1 до 150 МВА. Величина тока дуги от 5 кА до 90 кА. Вторичное линейное напряжение печного трансформатора лежит в пределах от 200 до 1200 В.

2. *Свободно конвективные дуги в смеси воздуха и углекислого газа, электрод графитовый* (дуговые сталеплавильные печи постоянного тока (ДСППТ)). Мощность современных ДСППТ достигает 100 МВА. Величина тока дуги до 120 кА. Напряжение дуги до 950 В.

3. *Дуга в вынужденном потоке газа с вольфрамовым, циркониевым или гафниевым катодом*. Дуга вынесена на изделие-электрод. (плазменные горелки ПГ). Ток дуги лежит в пределах от 150 до 500А. Напряжение дуги изменяется в пределах от 100 до 450 В.

4. *Дуга в вынужденном потоке аргона, азота или их смеси в плавильной керамической камере, катод вольфрамовый* (плазменно-дуговые печи (ПДП) с керамическим тиглем). Дуга вынесена на расплавляемый металл или ванну жидкого металла, которые в данном случае являются анодом. Ток дуги изменяется от 2000 А до 10 кА. Напряжение от 300 до 850 В.

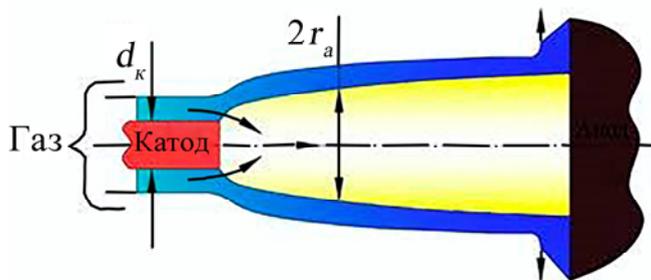
5. *Дуга в интенсивном потоке нагреваемого газа* внутри металлического охлаждаемого водой разрядного канала с вольфрамовым, циркониевым или гафниевым катодом (струйные дуговые плазмотроны) (ПДС) для установок плазменных технологий в металлургии, химии и т.д. Мощность дуги от 20 до 2000 кВт. Ток дуги от 300 до 900 А. Напряжение дуги лежит в пределах от 150 до 2500 В.

Несмотря на столь значительное многообразие видов и характеристик электрической дуги в электротермии, характеристики нагрева электрической дугой зависят прежде всего от характера и интенсивности теплообмена дуги с обдуваемым дугу потоком газа или окружающей дугу средой в рабочем пространстве. Роль процессов теплообмена в прианодном и прикатодном слоях дуги не велика и, обычно, не определяет рабочие характеристики нагрева. Основная роль в процессах нагрева принадлежит столбу электрической дуги, так как основная часть энергии в указанных выше дугах выделяется в столбе, а не в катодной и анодной областях дугового разряда. Такие дуги в теории разряда называются «длинными» дугами. Однако сами процессы на катоде дуги в значительной степени влияют на характер горения дуги, движение плазмы в столбе дуги и, что особенно важно, определяют ресурс работы катода как элемента конструкции дуговой установки.

Как проводник тока в газе электрическая дуга представляет собой плазменный осесимметричный канал, заключенный между поверхностями катода и анода. Учитывая осесимметричный характер распределения характеристик в каждом сечении такого канала, для математического описания дуги используется

цилиндрическая система координат. Граничным условием такого проводника является изотерма  $T_p(z, r)$ , для которой значение удельной проводимости плазмы  $\sigma$  приближается к нулю. Граничной значимой величиной удельной проводимости плазмы для дуговых и плазменных установок может быть принята  $\sigma_p = 45 - 55$  Си/м. Это условие задает изотерму  $T_p(z, r)$  как границу плазменного канала тока и, следовательно, границу поверхности самой электрической дуги. Например, для аргона, воздуха, углекислого газа граничная изотерма  $T_p(z, r) = 5500$  К, для водорода и азота  $T_p(z, r) = 6500$  К. Если не принимать специальных мер по стабилизации геометрического расположения дуги (свободно горящая дуга), то пространственная осевая линия тока дуги может принимать произвольную форму в зависимости от действующих на столб дуги внешних сил: газодинамических, электродинамических и т.д. Свободно горящая дуга чрезвычайно нестабильна, имеет быстроменяющуюся геометрическую конфигурацию столба, длина и положение столба дуги в пространстве непрерывно изменяются, что приводит к случайным и резким изменениям объема и характеристик плазмы неустойчивого в пространстве столба дуги. Дуга становится фактически неуправляемой и не поддающейся контролю с точки зрения задания необходимых энергофизических характеристик нагрева вещества. Поэтому для обеспечения устойчивости и управляемости параметрами нагрева электрической дугой в электротермии используют различные способы стабилизации дуги в рабочем пространстве установки.

В плазменно-дуговых печах применяется стабилизация дуги струей газа, истекающей из сопла плавильного плазмотрона и обдувающей дугу (рис. 5.3). В промышленных струйных плазмотронах дуга обдувается интенсивным потоком газа, сжатого стенками разрядной камеры (рис. 5.2). В плазменных горелках внутренняя часть столба обжата потоком газа и стенками вихревой камеры и канала сопла, а внешняя часть столба стабилизирована струей газа, истекающей из сопла.



**Рис. 5.3. Схема плавильного плазмотрона с дугой, вынесенной на анод-изделие:**

$d_k$  – диаметр катода;  $2r_a$  – диаметр плазменного столба

Сжатие дуги потоком газа и стенками разрядной камеры не только стабилизирует геометрическое расположение столба дуги, но и интенсифицирует ее тепловые характеристики в сравнении со свободно дугой. При одинаковом значении тока в стабилизированной дуге в сравнении со свободногорящей, возрастает напряженность электрического поля, повышается осевая и средняя температура столба, интенсифицируется отвод тепла от дуги за счет конвекции. Главным итогом указанных способов стабилизации плазменной дуги является ограничение колебаний длины  $l_a$  дуги, как длины осевой линии тока столба, и, следовательно, всех электрических и тепловых характеристик дуги как нагревателя.

С точки зрения математического описания электрической дуги фиксация осевой линии тока столба и длины дуги позволяет воспользоваться цилиндрической системой координат. Если пренебречь влиянием на характеристики плазмы внешних сил тяжести, то в случае осесимметричной модели столба одножидкостной модели плазмы электрической дуги принимают вид:

– уравнение энергии

$$\begin{aligned} \sigma(T)E^2 = \sigma_\varepsilon(T) + \rho(T)V \frac{dh(T)}{dx} - \\ - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r\lambda(T) \frac{dT}{dr} \right] + \frac{d\rho(T)h(T)}{dt} \sigma(T)E^2; \end{aligned} \quad (5.1)$$

– уравнение движения

$$\rho V_x \frac{dV_x}{dx} = - \frac{dp}{dx} + \mu_0 J_r H_\varphi + \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{d^2 V_x}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV_x}{dr} \right); \quad (5.2)$$

– уравнение пинча дуги

$$- \frac{dp}{dr} + \mu_0 J_x H_\varphi = 0; \quad (5.3)$$

– уравнение закона Ома

$$j = \sigma E, \quad (5.4)$$

где теплофизические параметры плазмы:  $\sigma$  – удельная электропроводность,  $\eta$  – вязкость,  $\sigma_\varepsilon$  – объемная плотность мощности излучения плазмы,  $\rho$  – плотность,  $h$  – удельная энтальпия,  $\lambda$  – теплопроводность,  $p$  – давление,  $V$  – скорость движения,  $T$  – температура; электрические параметры:  $j$  – плотность тока ( $J_r, J_x$  – составляющие вектора плотности тока в цилиндрической системе координат),  $E$  – напряженность электрического поля;  $H$  – напряженность магнитного поля,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума (равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Таким образом, важнейшими геометрическими условиями стабилизированной дуги являются длина дуги  $l_a$ , как длина осевой линии тока, и граница столба дуга (плазменного канала тока) в виде изотермы  $T_p(x, r) = 5500 - 6500\text{K}$ . Последнее условие является физическим объяснением понятия радиуса дуги  $r_a(x)$ .

Термическая плазма столба электрической дуги контактирует с электродами. Как отмечалось ранее, при дугах постоянного тока катодом в ЭТУ может быть графитовый (ДСПТ), вольфрамовый (ПДП, ПДС, ПГ), гафниевый (ПДС, ПГ) электрод. Высокий уровень температур на поверхности этих катодов обеспечивает преобладающее влияние в дугах ЭТУ термоэмиссионного вида эмиссии электронов. Между эмиссионной поверхностью катода, получившей название катодного пятна дуги, и поверхностью столба в виде изотермы  $T_p(x = 0, r) = 5500 - 6500\text{K}$  формируется пограничная прикатодная область дуги в виде ленгмюровского и ионизационного слоев.

Вблизи поверхности катода поверхность плазменного столба  $T_p(x = 0, r) = 5500 - 6500\text{K}$  соприкасается с границей ионизационного слоя (рис. 5.4). В непосредственной близости от поверхности катода находится бесстолкновительный ленгмюровский слой пространственного заряда. Протяженность последнего слоя соизмерима с радиусом Дебая плазмы. Обычно данный слой частицы всех сортов проходят без столкновений. Ионизационный слой содержит сильно неравновесную плазму с существенным превышением энергии электронов над кинетической энергией ионов и атомов, где благодаря интенсивной релаксации потока электронов, эмитированных катодом, наблюдается ионизация атомов газа. Характерной длиной ионизационного слоя следует считать длину пути установления локального термодинамического равновесия в плазме, что соответствует примерно 7–12 длинам свободного пробега электронов в плазме на границе ионизационного слоя, примыкающей к столбу дуги. Эмиссионные процессы электронов в катоде и процессы переноса электрического заряда в бесстолкновительном и ионизационном слоях в значительной степени зависят от характеристик плазменного столба на границе с ионизационным слоем. Эта граница столба может считаться начальной точкой отсчета в системе координат исходных уравнений (5.1)–(5.4), описывающих одно жидкостную модель плазмы в дуге.

На рисунке 5.4. изображена предложенная в работе [9] модель электрической дуги Меккера [10], содержащая: 1 – катод; 2 – катодное пятно; 3 – электрический слой; 4 – газодинамический слой; 5 – корпусная часть столба; 6 – цилиндрическая часть столба; 7 – поток массы плазмы.

В отличие от катода, анод в дуге не может быть эмиттером электрически заряженных частиц – ионов. Процессы в прианодном слое, граничащем с изотермой  $T_p((l_a - \Delta x_A), r) = 5500 - 6500\text{K}$  столба, обычно не оказывают существенного влияния на характеристики плазмы дуги. Здесь  $\Delta x_A$  – протяженность слоя

прианодного падения электрического потенциала. Важнейшими в этом слое являются процессы теплообмена столба с анодом. Характер потоков тепла в этом слое в значительной мере определяет процесс нагрева анода, который в электро-технологии часто выступает в роли изделия, нагреваемого дугой.

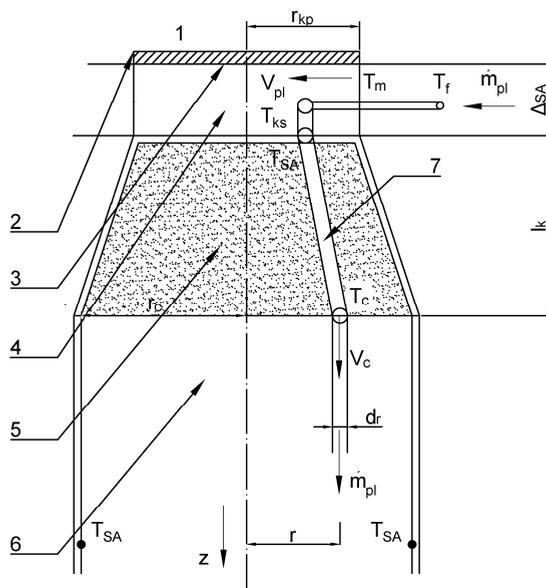


Рис. 5.4. Структура модели электрической дуги Мекера

Общий характер и физический смысл кинетических процессов в плазме столба и омывающем дугу потоке газа не позволяет указать положение границы столба дуги в виде пространственной изотермы  $T_p(x, r) = 5500 - 6500$  К и определить теплообменные характеристики дуги в рабочем объеме электротермической установки. Подвижность в пространстве и неопределенность положения границы дуги затрудняет применение теории пограничного слоя для описания процессов теплообмена между дугой и окружающей дугу средой. Характер этих процессов обусловлен совокупностью электродинамических, электрофизических и газодинамических процессов в плазме столба, зависящих от газодинамических и тепловых процессов в турбулентном потоке газа, омывающем дугу в установке. Дуга в любом варианте дуговой или плазменной установки омывается потоком газа – свободно конвективным в ДСП, ДСППТ или вынужденным в ПДП, ПДС, ПГ. Для большинства технологий, связанных с нагревом дугой, движение потока газа вне дуги является турбулентным, что определяет турбулентный характер всех процессов тепло- и массопереноса за пределами дуги. С точки зрения теории теплообменных процессов, важнейшим вопросом дугового нагрева является влияние турбулентности в потоке газа на характеристики и процессы в самой дуге.

Если предположить, что турбулентный характер процессов переноса тепла в потоке газа распространяется и на плазму столба, то тогда характер теплообменных процессов между дугой и потоком газа будет иметь объемный характер без резкого изменения коэффициентов переноса на границе дуги. Турбулентный характер процессов переноса в объеме плазмы должен был бы привести к значительной интенсификации дугового нагрева и, как следствие, к резкому увеличению удельной мощности джоулевых источников тепла ( $\sigma E^2$ ) и напряженности электрического поля  $E$  в плазме столба дуги. Сам этот факт турбулизации плазмы в дуговом разряде имел бы крайне важное практическое значение с точки зрения резкой интенсификации нагрева дугой в электротермии.

Однако уже первые опыты практического применения плазменного нагрева показали, что существование даже развитой турбулентности в потоке газа, обдувающим дугу, не приводит к радикальному изменению характера теплообменных процессов в дуге. Возникновение турбулентности в потоке газа приводит только к структурной перестройке в виде сжатия столба без существенного изменения напряженности электрического поля в плазме и интенсивности процессов переноса тепла в столбе дуги. Это указывает на отсутствие турбулентного характера переноса энергии в плазме столба дуги даже при развитой турбулентности в потоке газа за пределами дуги. Этот установленный многочисленными экспериментами факт позволил предположить, что при появлении турбулентности в потоке газа вне дуги плазма в объеме столба остается ламинарной с ламинарным характером процессов тепло и массопереноса.

Ламинарный характер течения плазмы в столбе даже при развитой турбулентности в наружном потоке газа обусловлен резким нарастанием диссипативных сил  $\Phi$  на границе столба дуги  $T_p(x, r) = 5500 - 6500$  К вследствие увеличения вязкости газа. Эта закономерность свойственна любому плазмообразующему газу. Данный процесс гашения даже интенсивной развитой турбулентности на поверхности дуги приводит к появлению двухслойной коаксиальной теплообменной структуры нагрева дугой в виде внутренней области плазменного канала электрического тока с ламинарным характером движения плазмы, в которой процессы тепло- и массопереноса имеют ламинарный вид, и наружной области турбулентного потока газа, омывающего дугу, в которой процессы переноса тепла являются турбулентными. С точки зрения моделирования теплообменных процессов, при нагревании дугой такую модель будем именовать «моделью двухслойной дуги».

Установленные экспериментально стационарность и стабильность модели двухслойной дуги имеет чрезвычайно важное теоретическое и практическое значение. Основопологающим свойством двухслойной модели дуги является вывод об отсутствии конвективного переноса тепла через поверхность дуги. Если реальностью является стационарность существования границы раздела ламинарной и турбулентной областей тепло- и массопереноса в объеме газа или

плазмы, то любой конвективный перенос тепла через данную границу раздела не возможен. Это принципиальное ограничение, накладываемое на процессы теплообмена при дуговом нагреве, объясняет установленный опытом факт существования значительных трудностей в интенсификации дугового нагрева в плазматронах различного типа, известных в настоящее время. Данное свойство двухслойной газодинамической модели дуги, сформулированное на основе методов современной теории теплообменных процессов нагревания дугой, совпадает с давно известным феноменологическим выводом о том, что дуга по отношению к наружному потоку газа ведет себя как «квазитвердое» тело. В отличие от твердого тела столб дуги чрезвычайно подвижен и неустойчив в пространстве. Теория гидродинамической устойчивости позволяет объяснить неустойчивость поверхности электрической дуги, описать характеристики временных и пространственных колебаний этой поверхности как границы модели двухслойной дуги. Только данная газодинамическая природа возмущений поверхности дуги является реальной. Обратимость процессов возмущения невозможна при появлении магнитогидродинамической неустойчивости дуги.

Условие модели двухслойной дуги об отсутствии конвективного переноса тепла через поверхность столба позволяет использовать для моделирования и математического описания процессов нагрева дугой известные понятия теории пограничного слоя. В частности, для описания процесса теплообмена в дуговой установке можно использовать граничное условие третьего рода и понятие коэффициента теплоотдачи дуги в процессах ее теплообмена с окружающей средой в объеме рабочей камеры дуговой или плазменной установки

$$q_{konv}(x) = \frac{P_\lambda(x)}{2\pi r_a(x)} = \alpha(x)(T_p - T_{ot}), \quad (5.5)$$

где  $q_{konv}$  – плотность потока тепла на поверхности дуги, обусловленного конвективным теплообменом между дугой и обдувающим ее потоком газа;  $\alpha(x)$  – локальный коэффициент теплоотдачи дуги как характеристика, моделирующая интенсивность процесса теплообмена дуги и наружного турбулентного потока газа;  $T_{ot}$  – характерная средняя температура потока газа, омывающего дугу в рабочем объеме установки, как теплового ядра для модели пограничного слоя модели двухслойной дуги;  $T_p = T_p(r_a(x)) = T_p(x, r) = 5500 - 6500$  К – температура на поверхности столба дуги;  $P_\lambda$  – линейная плотность мощности рассеиваемой энергии электрического поля столба за счет теплопроводности плазмы

$$P_\lambda(x) = 2\pi \int_0^{r_a(x)} -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r\lambda(T(r, x)) \frac{dT(r, x)}{dr} \right) dr, \quad (5.6)$$

где  $r_a$  – радиус столба электрической дуги.

При формировании граничных условий теплообменных процессов на поверхности дуги можно использовать справедливые для решения практических задач выводы современной теории радиационных процессов в термической плазме дуги. Во-первых, излучение плазмы имеет объемный характер, и для описания характеристик излучения дуги нельзя использовать закон Стефана–Больцмана, описывающий излучение поверхности нагретого твердого тела. Во-вторых, излучение плазмы формируется в каждом элементарном объеме плазмы столба. Интегральное излучение термической плазмы зависит от профиля  $T(r, x)$  температурного поля дуги и определяется теплофизической характеристикой удельной мощности объемного излучения  $\sigma_\varepsilon(T)$  плазмы.

В-третьих, размеры столба и теплофизические свойства термической плазмы в дуговых и плазменных установках позволяют для моделирования радиационных процессов использовать условие оптически тонкого слоя. Плазму можно считать прозрачной для собственного излучения.

В связи с этим, если на данном участке столба  $\Delta x$  известен профиль температурного поля  $T(r, x)$  дуги, то мощность излучения столба на этом участке составит

$$\Delta P_\varepsilon(x) = \left( 2\pi \int_0^{r_a(x)} \sigma_\varepsilon(T(r, x)) r dr \right) \Delta x, \quad (5.7)$$

а плотность теплового излучения (радиационного потока тепла) на поверхности столба будет равна

$$q_\varepsilon(x) = \frac{\int_0^{r_a(x)} \sigma_\varepsilon(T(r, x)) r dr}{r_a(x)}. \quad (5.8)$$

Модель двухслойной дуги может быть применена только для случая так называемой «длинной дуги». Вблизи поверхности катода столб дуги отличается сильной неоднородностью по длине из-за турбулентности газа в области канала электрического тока. Этот процесс турбулизации плазмы в дуге вызван интенсивным всасыванием дугой газа из внешней по отношению к дуге среды в тонком пограничном слое вблизи эмиссионной поверхности катода. Турбулентный характер теплообмена дуги с внешней газовой средой приводит к увеличению интенсивности рассеяния энергии электрического поля за счет конвективной составляющей и появлению интенсивных потоков тепла и массы на поверхности столба. Тем самым нарушается основное условие модели двухслойной дуги – отсутствие конвективного переноса тепла через поверхность столба. Граничное условие третьего рода и понятие коэффициента теплоотдачи дуги в этой прикатодной области столба теряют физический смысл. По мере удаления от катода

движение плазмы в столбе приобретает ламинарный характер, и условия теплообмена дуги с окружающей средой приближаются к условиям модели двухслойной дуги. Длина этой переходной области столба вблизи поверхности катода соизмерима с диаметром столба дуги в удалении от катода и составляет примерно  $l_k \approx 2,5 \cdot r_c$ , где  $r_c$  – радиус части столба в удалении от катода, в которой соблюдаются условия модели двухслойной дуги. Если длина дуги  $l_a$  намного превосходит длину прикатодного переходного участка  $l_k$  ( $l_a \gg l_k$ ), то такая дуга считается «длинной дугой». К длинным дугам можно отнести все дуги постоянного тока в ДСППТ, ПДП, ПДС и ПГ. В связи с этим можно считать, что к этим установкам при анализе средних по длине дуги электрических и тепловых характеристик полностью применимы условия теплообмена модели двухслойной дуги, в том числе граничное условие третьего рода (5.7) на поверхности столба и понятие коэффициента теплоотдачи дуги.

Коэффициент теплоотдачи дуги зависит от многих конкретных факторов, к числу которых можно отнести характерную температуру среды, в которой горит дуга или затоплена нагреваемая дугой струя, химический состав среды, температуру внутренней поверхности керамических стен ванны печи, характерную среднюю температуру потока газа в разрядном канале струйного плазмотрона или плазменной горелки, размеры разрядной камеры и сопла струйного и плавильного плазмотронов и плазменной горелки, поток массы плазмообразующего газа, длину и ток дуги и т.д. Модель двухслойной дуги дает возможность отыскания многофакторной функции коэффициента теплоотдачи дуги по легко измеряемым геометрическим и внешним электрическим параметрам каждой конкретной ЭТУ с нагревом электрической дугой.

Несмотря на многообразие типов и конструкций электродуговых плазмотронов (ЭДП) [7, 8] и их различия, в основе функционирования плазмотронов лежат общие закономерности и физические процессы, протекающие либо непосредственно в дуге, либо тесно связанные с ее свойствами в объеме разрядной камеры.

## **5.2. Некоторые схемы электродуговых плазмотронов и особенности дуги постоянного тока в канале с потоком газа**

В этом разделе рассматривается электрическая дуга, которая относится к контрагированным разрядам с высокой плотностью тока. Например, в области плазменного столба (ПС) дуги плотность тока составляет  $10-10^3$  А/см<sup>2</sup>, на катоде  $10^3-10^8$  А/см<sup>2</sup>, а на аноде, соответственно,  $10^4$  А/см<sup>2</sup> [6, 7]. Большая плотность тока и высокий уровень вводимой в разряд мощности позволяют разогревать потоки плазмы до температуры в несколько десятков тысяч градусов.

Рассмотрим некоторые особенности дуги в канале с потоком газа на примере однокамерного ЭДП с вихревой стабилизацией дуги (рис. 5.5а). Основными элементами конструкции ЭДП указанной схемы являются охлаждаемые катод 1, анод 3 и вихревая камера 2. Плазмообразующий газ поступает в канал через тангенциальные отверстия вихревой камеры, нагревается дугой до высоких температур и истекает через сопло анода в виде плазменной струи. Основная часть дуги стабилизируется на оси разрядной камеры (РК) вихревым (закрученным) потоком газа, а радиальный прианодный участок вращается с большой скоростью по поверхности анода, что предотвращает его интенсивную эрозию. Закрученный поток газа стабилизирует ПС дуги вдоль оси канала за счет архимедовых сил, которые отжимают более холодные слои газа к стенкам канала, создавая некоторое разрежение на оси. Естественно, что интенсивность закрутки газа будет влиять некоторым образом на свойства дуги, а выделение джоулевого тепла в дуге – на свойства газового вихря. Наибольшее влияние интенсивность закрутки газа оказывает на состояние и ресурс работы электродов. В то же время интенсивность закрутки газа слабо влияет на характеристики плазмы в области ПС дуги. Объясняется это тем, что из-за высокой температуры на оси дуги плотность газа там мала и закрутка практически не влияет на кинетику процессов в плазме ПС [6–8].

Радиус плазменного столба дуги зависит от силы тока, рода плазмообразующего газа и его расхода. С ростом силы тока радиус электропроводящей области дуги увеличивается, однако плазма не достигает стенок РК. В результате интенсивного охлаждения элементов конструкции ЭДП между дугой и стенкой разрядного канала всегда находится слой холодного, практически неэлектропроводного газа. В этом слое, между ПС дуги и стенкой канала, существует переменная вдоль оси канала разность потенциалов. Благодаря процессам термической ионизации, диффузии заряженных частиц холодный слой газа всегда содержит небольшую концентрацию носителей заряда. Вследствие этого снижается его электрическая прочность и создаются благоприятные условия для электрического пробоя промежутка ПС дуги – стенка РК. Из-за пробоя в некотором сечении РК (участок М рис. 5.5а) возникает новый укороченный проводящий участок дуги. Прежний электропроводный канал, имеющий большее электрическое сопротивление, угасает. Далее новое опорное пятно дуги сносится вниз потоком газа, дуга снова вытягивается вдоль РК до момента возникновения нового пробоя и процесс периодически повторяется. Сокращение длины дуги благодаря электрическим пробоям в рассмотренной области канала называется **крупномасштабным шунтированием**. Шунтирование части положительного столба дуги в канале является одним из основных процессов, происходящих в дуговых плазмотронах. Наряду с крупномасштабным шунтированием, в ЭДП имеет место и мелкомасштабное шунтирование петли дуги в прианодной области. Суть этого процесса заключается в том, что между частями ПС дуги всегда имеется разность

потенциалов, которая способствует пробое между прямолинейной (осевой) и искривленной (прианодной) частями ПС. Периодическое шунтирование этих участков ПС ведет к небольшому изменению длины дуги. Как видно, в ЭДП указанной схемы длина дуги в РК устанавливается произвольным образом, поэтому они называются *плазмотронами с самоустанавливающейся длиной дуги*. Наиболее полно механизмы шунтирования в ЭДП исследовались в работах М.Ф. Жукова и др. [6–8, 11].

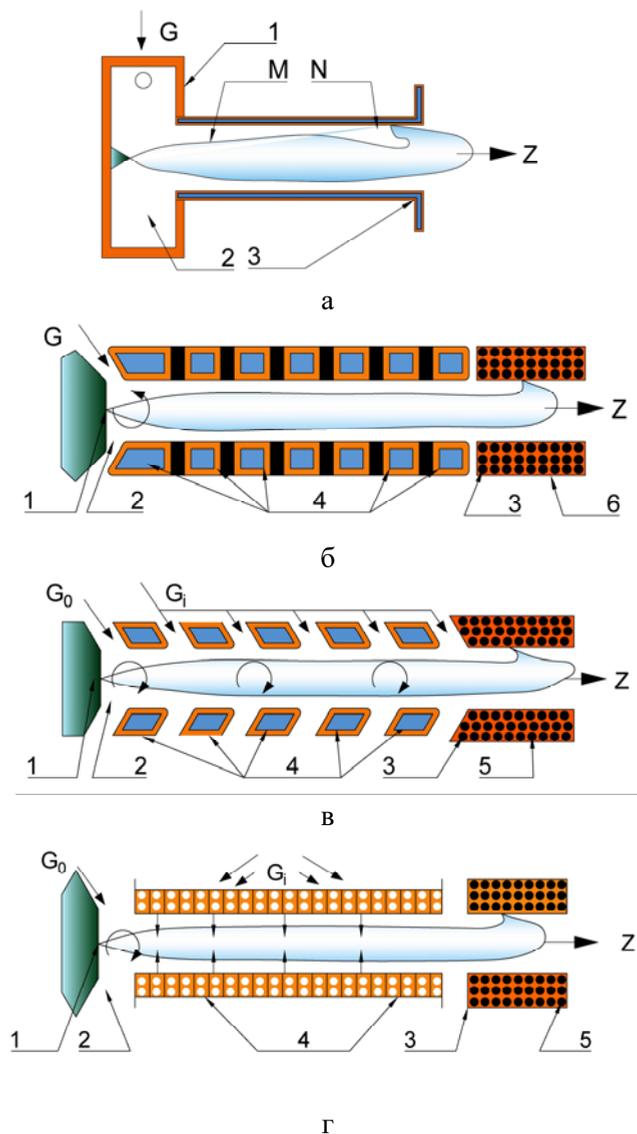


Рис. 5.5. Принципиальные схемы электродуговых плазмотронов постоянного тока

Процессы крупномасштабного шунтирования вызывают значительные пульсации длины дуги, напряжения горения, мощности разряда, тепловых и газодинамических параметров потока плазмы. Так, например, колебания напряжения могут достигать до 40–50% от среднего значения. Частота крупномасштабного шунтирования обычно лежит в пределах от нескольких Гц до 10 кГц, а частота мелкомасштабного шунтирования находится в области 100 кГц. При этом, амплитуды колебаний параметров ЭДП и плазменной струи достигают до 10% от средних значений. Значительное сокращение длины дуги из-за крупномасштабного шунтирования является основной причиной падения напряжения горения дуги с ростом тока. Этим обусловлено существенное ограничение мощности энергии электрического поля, вкладываемой в нагрев потока плазмы, а, следовательно, и температуры истекающей плазменной струи в ЭДП с самоустанавливающейся длиной дуги.

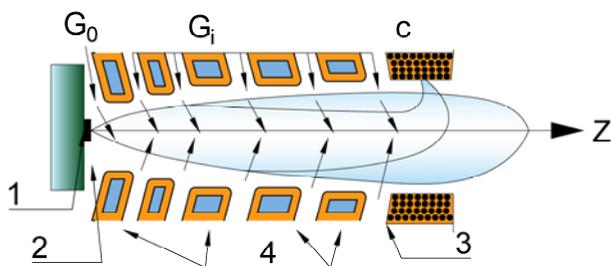
Создание плазмотронов с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) (рис. 5.5 б) позволило значительно улучшить технологические параметры ЭДП. Конструктивной особенностью таких плазмотронов является наличие между катодом и анодом длинной, электрически изолированной межэлектродной вставки, состоящей из изолированных друг от друга секций (колец). Использование МЭВ позволило избавиться от крупномасштабных пульсаций параметров дуги из-за шунтирования и добиться фиксирования длины дуги в ЭДП. Поэтому плазмотроны с МЭВ **называют еще плазмотронами с фиксированной длиной дуги**. Меняя количество секций МЭВ, можно создавать плазмотроны с различной длиной канала и дуги. Такие плазмотроны отличаются высокой стабильностью параметров разряда и потока генерируемой плазмы. Основными причинами колебаний параметров у них являются мелкомасштабное шунтирование дуги, пространственные перемещения анодного и катодного пятен, пульсации тока и напряжения источника электропитания, колебания газодинамических параметров и пространственная неустойчивость вихревого потока газа, турбулентность и т.д. [6–7, 11–12].

Дальнейшим развитием плазменного аппаратостроения явилось создание плазмотронов с подачей части плазмообразующего газа через зазоры между секциями МЭВ или через пористую стенку РК. Схемы ЭДП с распределенным вдувом газа приведены на рис. 5.5 в,г. В таких ЭДП ПС дуги дополнительно стабилизируется на оси потоком газа с интенсивным радиальным течением. Многочисленные исследования показали, что распределенный вдоль РК вдув плазмообразующего газа позволяет значительно снизить тепловые потери через стенки канала и этим повысить тепловой КПД нагрева и напряжение горения дуги. Используя МЭВ из пористого материала, тепловые потери в стенку РК можно снизить практически до нуля, обеспечивая тепловой КПД, близкий к единице [11–12]. В ЭДП с распределенным вдувом газа интенсивность вращения анодного пятна по поверхности анода несколько замедляется. Для интенсификации за-

крутки анодного пятна дуги в этой области канала обычно используют соленоиды. Все эти приемы позволяют получать необходимые тепловые параметры плазменной струи при меньших значениях силы тока, что приводит к уменьшению эрозии электродов и существенному увеличению их ресурса работы.

Еще одним способом повышения эффективности работы плазмотронов является профилирование сечения РК. Исследования [11 и др.] показали, что применение РК с МЭВ диффузорного типа (расширяющегося вниз по потоку газа) совместно с распределенным по длине канала вдувом газа, приводит к повышению энтальпии потока плазмы и КПД установки за счет снижения тепловых потерь через стенки канала по сравнению с цилиндрическими РК.

Рассмотренные схемы ЭДП относятся к линейным плазмотронам с продольно обдуваемой дугой. Известны различные модификации описанных устройств, например, двухкамерные ЭДП и плазмотроны с вынесенной дугой [13]. Особо следует отметить перспективность плазмотронов с распределенным по длине канала током. Плазмотроны с распределенным расходом газа и током открывают перспективу оптимизации ЭДП по основным параметрам. Некоторые принципиальные схемы таких ЭДП приведены на рис. 5.6. и 5.7, на которых изображены: 1 – катод; 2 – вихревая камера; 3 – анод; 4 – секции МЭВ;  $G$  – межсекционный вдув газа;  $C$  – соленоиды;  $K$  – катод;  $A$  – анод;  $R$  – балластное сопротивление;  $G$  – генератор.



**Рис. 5.6. Принципиальная схема ЭДП с разрядной камерой диффузного типа и распределенным вдувом газа**

Существенное влияние на характеристики и ресурс работы ЭДП оказывает материал, из которого изготовлены электроды, и условия их охлаждения. Наибольшее практическое применение получили термоэмиссионные стержневые катоды на основе вольфрама, обладающие высоким ресурсом работы при нагреве химически инертных газов – азота, водорода или их смесей.

При нагреве химически активных сред (кислород, воздух, водяной пар, углекислый газ, метан и др.) вольфрамовые катоды сгорают весьма быстро. В этих случаях в качестве катодов необходимо использовать металлы, которые, взаимо-

действуя с плазмообразующими газами, образуют на поверхности пленочные соединения, обладающие наряду с высокой термической устойчивостью высокими электроэмиссионными свойствами.

Такие катоды называются *термохимическими*. Основными материалами для термохимических катодов являются цирконий, гафний, титан, тантал, ниобий, лантан и др.

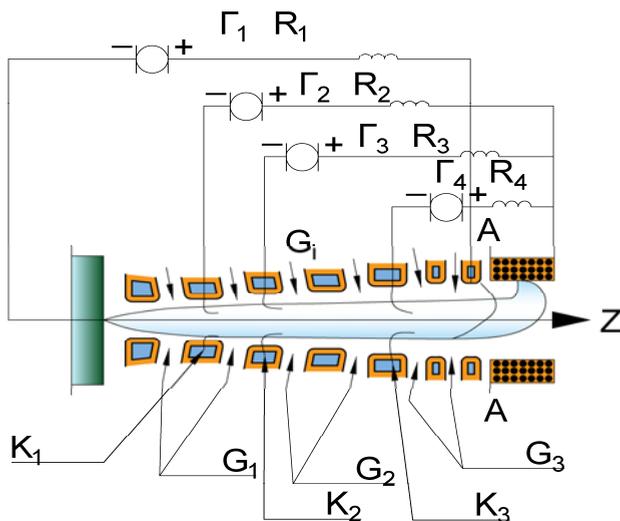
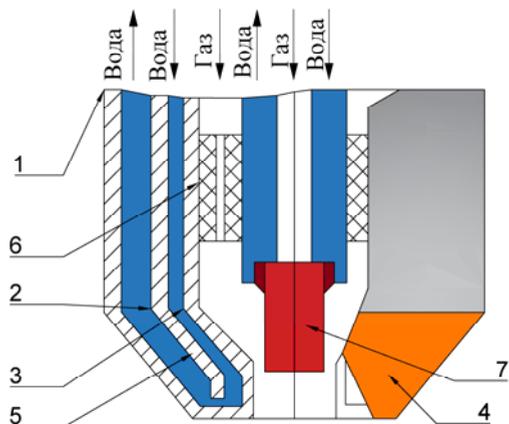


Рис. 5.7. Принципиальная схема ЭДП с изменяющимся по длине РК током и распределенным вдувом газа

Следует отметить, что из-за малой теплопроводности катоды из циркония и гафния используют в технологических плазмотронах с токами до 300 А. В мощных промышленных плазмотронах с токами 1 кА и более используют вольфрамовые стержневые катоды, но катодные узлы представляют собой довольно сложные конструкции, обеспечивающие химическую защиту вольфрамовых катодов газовой завесой из инертного газа [7, 8].

Как правило, сопло представляет собой отдельный узел и крепится на водоохлаждаемом корпусе плазмотрона (рис. 5.8). С помощью сопла происходит формирование потока газа в катодной области дуги. Сопло организует направленное продольное течение газа в столбе дуги, обеспечивая стабилизацию дугового разряда и конвективный перенос тепла от плазмы к металлической ванне. Оно служит также стартовым электродом – анодом при возбуждении дуги в электропечи с помощью осциллятора.



**Рис. 5.8. Конструктивное решение металлургических плазмотронов:**

1 – наружная труба корпуса; 2 – средняя труба корпуса;  
3 – внутренняя труба корпуса; 4 – медное сопло; 5 – перегородка; 6 – изолятор; 7 – катод

Вольтамперная характеристика (ВАХ) дуги зависит от рода и расхода газа, длины дуги, геометрических размеров плазмотрона (диаметра сопла и катода, заглубления катода в сопло), материала электрода, давления в рабочем пространстве печи и других параметров

По взаимосвязи электрической дуги как источника тепловой энергии и объекта нагрева электродуговые нагреватели газа являются аппаратами косвенного действия.

В большинстве случаев в плазмотронах данной группы для пространственной стабилизации дуги в разрядной камере используется закрученный поток газа. Поэтому они называются плазмотронами с газовихревой стабилизацией дуги (рис. 5.9).



**Рис. 5.9. Плавильный плазмотрон, работающий на аргоне при токах до 6000 А**

Поскольку столб дуги в канале располагается на оси разрядной камеры за счет стабилизирующего потока газа, струйные плазмотроны этой группы носят название плазмотронов осевой схемы. В них ось потока газа на длине положительного столба дуги совпадает с осью столба, т.е. дуга находится в продольном потоке газа. Кроме того, в этих плазмотронах электроды (стержневые, цилиндрические и др.) расположены по одной линии, направленной вдоль течения потока газа. Поэтому они получили еще название *плазмотроны линейной схемы*.

Простейшая схема линейного плазмотрона дана на рис. 5.5а. В таком плазмотроне вихревая камера расположена между плоским или стержневым электродом-катодом 1 и выходным трубчатым анодом 2. Из нее газ с расходом  $G$  вытекает в разрядную камеру через кольцо закрутки 3, которое, как правило, служит изолятором между электродами. Электрическая дуга 4 зажигается в межэлектродном зазоре каким-либо способом (например, осциллятором). Под действием осевой составляющей скорости потока газа дуга растягивается в направлении течения потока. Столб дуги стабилизируется на оси трубчатого электрода из-за градиента давления в вихре. Радиальный участок дуги замыкает столб дугового разряда на электрод.

В струйных плазмотронах выходной электрод выполняется в виде водоохлаждаемого снаружи полого цилиндра, в основном из меди, обладающей высокой тепло- и электропроводностью. Стенка электрода изнутри воспринимает мощный поток теплового излучения столба дуги, а также поток тепла от нагретого газа за счет теплопроводности и конвекции. Кроме того, на внутренней поверхности электрода находится опорное пятно дуги – высококонцентрированный источник тепла, под действием которого происходит разрушение материала электрода. Пятно дуги (катодное или анодное) не может находиться неподвижно на медной охлаждаемой стенке, так как из-за колоссальных тепловых потоков (порядка  $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>) электрод очень быстро выходит из строя (проплавляется насквозь). Поэтому условием длительного ресурса работы выходного электрода является непрерывное и достаточно быстрое перемещение опорного пятна дуги по его рабочей поверхности. У плазмотронов малой и средней мощности (от 20 до 100 кВт) это перемещение может быть достигнуто газовым вихрем, когда радиальный участок дуги совершает движение по винтовым траекториям. У более мощных плазмотронов уменьшение скорости разрушения цилиндрических электродов может быть достигнуто путем наложения осевого магнитного поля на область вращения радиальных участков дуги. Внешнее магнитное поле создается соленоидом, подключенным последовательно с дугой или к независимому источнику питания.

Применение внешнего магнитного поля приводит к усложнению конструкции плазмотрона, так как для создания в канале осевого магнитного поля электрод необходимо оснастить соленоидом, который питается постоянным током и должен находиться по возможности ближе к стенке электрода.

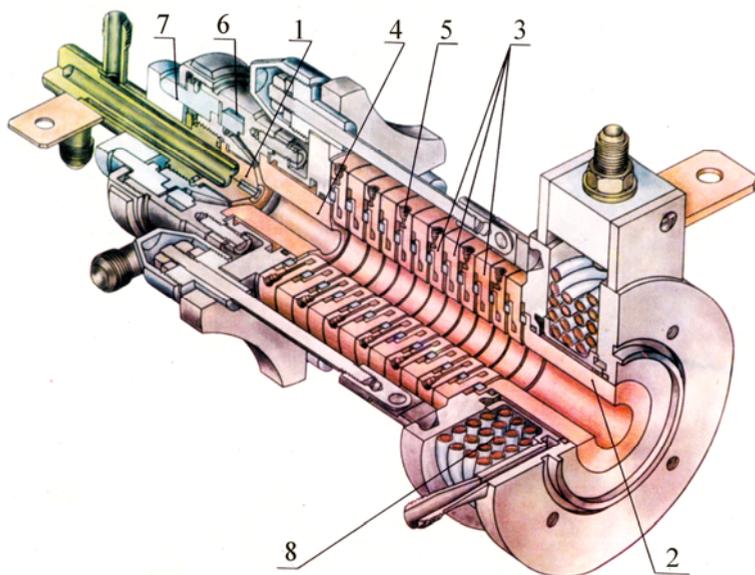
Последнее обстоятельство вынуждает иногда размещать обмотку соленоида в полости водяного охлаждения электрода. Электромагнитное вращение электродного пятна оказалось настолько эффективным средством повышения стойкости электрода, что его используют для увеличения срока службы не только выходных, но и внутренних цилиндрических электродов.

Вольтамперные характеристики дуги рассмотренных схем плазмотронов – падающие, за исключением схемы с внутренним коническим по потоку каналом. Поэтому при использовании источника электропитания с  $U_r = \text{const}$  в электрическую цепь дуги вводится балластное сопротивление для обеспечения устойчивого горения дугового разряда.

На рисунке 5.10 приведена конструкция плазмотрона ЭДП-119 с секционированной МЭВ мощностью до 1500 кВт (см. рис. 5.5а). Межэлектродная вставка состоит из набора индивидуально охлаждаемых, изолированных друг от друга и от электродов секций (шайб). В зазоры между секциями подается рабочий газ по заданному распределению вдоль длины МЭВ.

Плазмотрон предназначен для нагрева различных газов (азот, воздух, водород) и смесей газов (водород и метан, воздух и метан). Тепловой КПД плазмотрона составляет 0,8–0,9 при нагреве воздуха и водорода и 0,9–0,96 при нагреве смеси водорода с метаном.

В плазмотроне с длинной МЭВ, когда имеется участок развитого турбулентного течения, истекающая плазменная струя имеет равномерный профиль температуры по радиусу  $T(r)$  с коэффициентом заполнения на срезе сопла до 95%.



**Рис. 5.10. Изометрия конструкции плазмотрона ЭДП-119:**

1 – термокатод; 2 – анод; 3 – секции МЭВ; 4 – пусковая секция;  
5 – узел подачи рабочего газа; 6 – узел подачи защитного газа; 7 – изолятор; 8 – соленоид

Стабилизация дуги осуществляется подачей интенсивно закрученного потока газа на участке МЭВ. Регулировка мощности плазмотрона может осуществляться изменением величины тока, длины МЭВ, а также наложением на область столба дуги внешнего продольного или поперечного магнитного поля. Вольтамперные характеристики дуги в зависимости от рода газа и длины МЭВ имеют падающий и возрастающий виды.

Мощность технологических плазмотронов со ступенчатым выходным электродом составляет, как правило, до 1000 кВт (для нагрева не только водорода, но и других газов). Для достижения больших мощностей применяются плазмотроны с межэлектродными вставками различных схем.

### 5.3. Электрические и тепловые характеристики электродуговых плазмотронов постоянного тока

Анализ большого количества экспериментальных данных показывает, что эти характеристики зависят от режима течения, давления и физических свойств плазмообразующего газа, типа плазмотрона, размеров и геометрии РК, величины тока и ряда других факторов.

ВАХ плазмотрона является важнейшей интегральной экспериментально определяемой электрической характеристикой, позволяющей оценить энергетические возможности данного плазмотрона и параметров плазменной струи. Ввиду сильно нелинейной зависимости электропроводящих свойств плазмы от мощности разряда принято, что в ВАХ сила тока  $I$  выступает как аргумент, а напряжение разряда  $U$  является функцией. На рисунке 5.11 приведены типичные статические ВАХ в зависимости от расхода газа и геометрии РК плазмотронов с МЭВ. Длина канала 13 см, радиус 0,5 см, плазмообразующий газ – воздух [11].

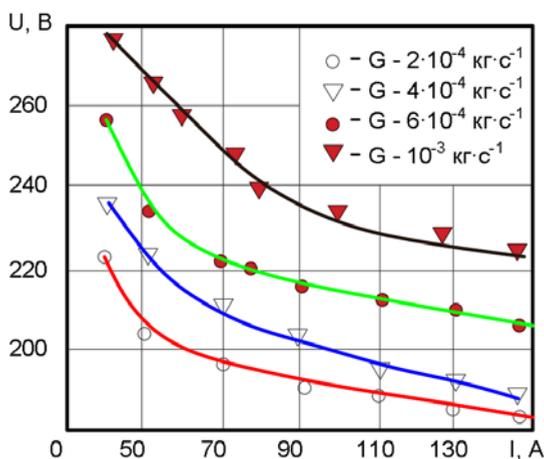


Рис. 5.11. Статическая ВАХ ЭДП постоянного тока с МЭВ

Рассмотрим причины формирования падающего участка ВАХ плазматронов. В соответствии с законом Ома для участка цепи падение  $U_c$  с ростом  $I$  связано с уменьшением электрического сопротивления дуги, что обусловлено процессами уменьшения длины дуги или ростом электропроводности дуги в целом. То есть, вид кривой падающий. На формирование диаметра столба дуги с ростом силы тока определяющее влияние оказывает взаимодействие электромагнитных сил сжатия и термогазодинамических сил растяжения. Многочисленные опыты показали, что повторяемость ВАХ в одном и том же плазматроне при одинаковых внешних условиях (параметрах  $R, I, G, P$ ) осуществляется с отклонениями  $\pm 10\%$ , что свидетельствует о высокой чувствительности дуговой плазмы и дуги в целом к различным внутренним возмущающим факторам.

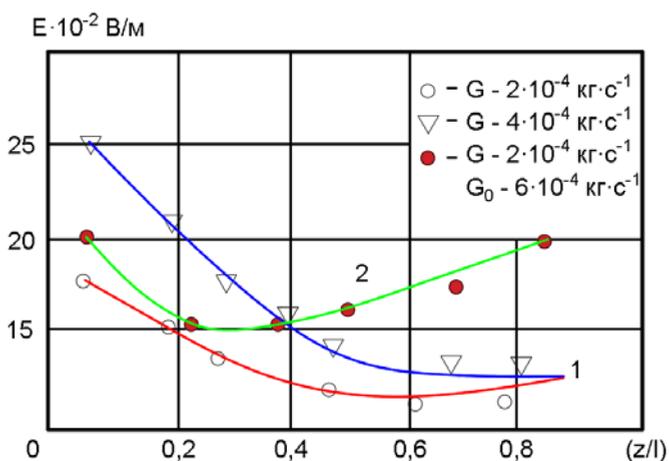
На основании исследований последних лет и согласно теории Г. Меккера можно принять, что при  $I = \text{const}$  в длинных дугах сильнее, чем в коротких, с ростом тока радиус нелинейно растет, а с увеличением давления падает. Результаты измерений зависят от целого ряда факторов, которые трудно систематизировать. Ориентировочно можно принять, что в диапазоне токов от 10 до 300 А радиус ПС обдуваемой воздухом свободной длинной дуги лежит в пределах от 1,5 до 2,5 мм при давлении 1–2 атм.

Применяя эти результаты для дуги в РК плазматрона с интенсивно охлаждаемыми стенками, можно предположить, что главным механизмом быстрого уменьшения электрического сопротивления дуги в области ПС с ростом силы тока будет рост степени ионизации плазмы из-за интенсификации процессов термической ионизации газа. Сравнение характеристик ЭДП в различных газах показывает, что напряжение дуги в молекулярных и инертных газах повышается с уменьшением молекулярной массы. Таким образом, для газов с большей теплоемкостью и теплопроводностью напряжение горения дуги будет выше [12].

При больших значениях силы тока ( $I > 200$  А) в плазматронах с фиксированной длиной дуги наблюдается формирование восходящего участка ВАХ с ростом тока. Объясняется это тем, что при больших значениях силы тока радиус дуги в данной РК достигает некоторой оптимальной величины и более не увеличивается с ростом силы тока. Такой режим работы ЭДП отличается высокими значениями температуры и степени ионизации плазмы. Указанные параметры плазмы приближаются к максимально допустимым в данных электрогазодинамических условиях и режимах функционирования ЭДП, поэтому интенсивность процессов термической ионизации частиц более не возрастает. Кроме того, в плотной плазме с ростом температуры увеличиваются сечения столкновений и растет частота столкновений электронов, что ведет к уменьшению их длины свободного пробега и, соответственно, подвижности. В совокупности указанные процессы ведут либо к постоянству электропроводности дуги с дальнейшим ростом тока, либо даже к ее уменьшению. Следствием всего этого становится формирование восходящей ветви ВАХ плазматрона.

Анализ зависимостей электрической мощности, выделяемой в ЭДП, от тока для падающего участка ВАХ показывает, что в исследованном диапазоне параметров величина мощности с ростом тока увеличивается, несмотря даже на уменьшение напряжения дуги. Следовательно, в соответствии с законом Джоуля–Ленца уменьшение сопротивления дуги идет медленнее, чем рост квадрата тока. Это свидетельствует о том, что электрическая дуга в плазмотроне является сильно нелинейным элементом электрической цепи.

Измеренные значения распределения потенциала  $\varphi(z)$  и напряженности электрического поля  $E(z)$  позволяют анализировать изменения локальных параметров плазмы в канале ЭДП. В опытах распределение потенциала в канале  $\varphi(z)$  определяют с помощью зонда или путем измерения разности потенциалов между электрически изолированными тонкими секциями МЭВ и анодом, потенциал которого обычно принимают за нуль. Распределение напряженности электрического поля  $E(z)$  находят, вычисляя отношение  $\Delta\varphi/\Delta z$  вблизи окрестности сечения  $z$ . Типичные распределения  $E(z)$  в линейных плазмотронах с МЭВ приведены на рис. 5.12 из работы [5.11]. Как видно, величина  $E$  вниз по потоку газа вначале резко падает, затем ее падение замедляется и в пределе  $E$  от  $z$  не зависит. С ростом расхода газа значение  $E$  увеличивается. При прочих равных условиях в плазмотронах с МЭВ и распределенным вдоль канала расходом газа напряженность поля выше, чем в плазмотронах с сосредоточенным вдувом в катодной области. Такое же повышение  $E$  наблюдается и при использовании РК диффузорного типа. В плазмотронах с расширяющимся каналом и распределенным вдувом газа существует восходящий участок зависимости  $E(z)$  (кривая 2).



**Рис. 5.12.** Распределение напряженности электрического поля в канале ЭДП с МЭВ.

Длина канала  $l = 13$  см, радиус  $R = 0,5$  см плазмообразующий газ – воздух,  
 1 –  $I = 50$ А; 2-  $I = 150$ А, в 1 – расширяющийся канал  
 и между секциями подается газ, а 2 – цилиндрический (рис. 5.5.б)

Проанализируем причины такого поведения напряженности электрического поля в канале ЭДП, используя формулу  $E = j/\sigma$  и результаты измерений распределения тепловых потоков в стенку РК при установившихся значениях тока и расхода газа.

В плазмотронах не вся выделенная электрическая энергия передается нагреваемому газу. Часть энергии теряется через охлаждаемые элементы конструкции – катод, анод и стенки РК. На рисунке 5.13 представлены распределения [11] тепловых потоков  $q$  вдоль канала ЭДП, где координата  $z$  направлена вдоль оси канала, а сечение  $z = 0$  соответствует катодному пятну. Как видно, по характеру изменения  $q(z)$  можно выделить три участка. На начальном участке тепловой поток через стенку канала мал и с ростом  $z$  меняется слабо.

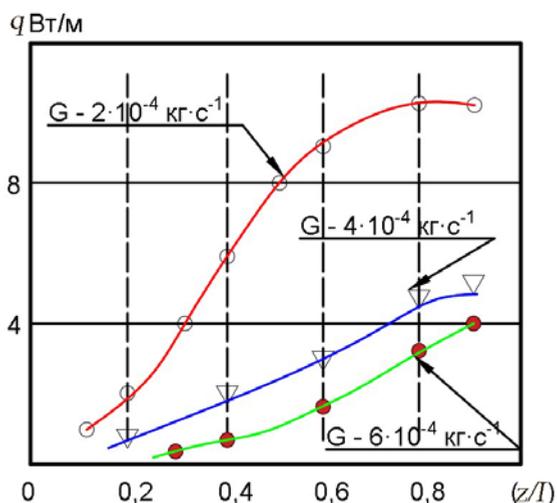


Рис. 5.13. Распределение тепловых потоков вдоль разрядной камеры ЭДП с МЭВ.  
Длина канала  $l = 13$  см, радиус  $R = 0,5$  см, сила тока  $I = 60$  А

Резкое возрастание  $q$  наблюдается на переходном участке. При дальнейшем увеличении  $z$  рост  $q$  замедляется. Участок дуги, где  $q$  от  $z$  зависит, называют *предельным участком*. Такой ход кривых распределения  $E(z)$  и  $q(z)$  связан с особенностями развития положительного столба дуги в канале и, в частности, с формированием его радиуса [11].

Начальный участок ПС дуги вблизи катода отличается большими значениями плотности тока. Газ здесь относительно холодный и большая часть его обладает малой электропроводностью, поэтому напряженность поля большая. Ввиду малости радиуса ПС дуги расстояние между ПС и стенкой велико. Молекулярный перенос тепла между стенкой РК и ПС осуществляется посредством концентрационной и термодиффузии, которые пропорциональны градиенту температуры. На начальном участке ПС дуги этот градиент относительно мал и основным меха-

низмом потери тепла здесь будет излучение дуги. На переходном участке ПС радиус дуги приближается к стенке РК, плотность тока уменьшается, температура плазмы и ее электропроводность повышаются, а величина  $E$  падает. Толщина холодного слоя газа между ПС и стенкой канала быстро уменьшается, что ведет к резкому увеличению здесь градиента температуры и, соответственно, быстрому росту радиального переноса тепла за счет теплопроводности от дуги к стенке РК.

Сравнительный анализ зависимостей  $E(z)$  и  $q(z)$  показывает, что в плазмотронах с цилиндрической РК и сосредоточенным вдувом газа предельный участок дуги достаточно протяженный и устанавливается быстро. Следует отметить, что в области переходного участка ПС дуги процессы ионизации и нагрева газа протекают наиболее интенсивно. В начальных сечениях предельного участка дуги тепловые параметры ПС и потока плазмы практически устанавливаются и с ростом  $z$  меняются мало (рис. 5.14). Таким образом, мощность, выделяемая здесь, не ведет к дальнейшему росту температуры газа, поэтому для повышения КПД ЭДП стремятся сократить длину предельного участка путем применения распределенного вдува газа, профилированием сечения РК и другими способами. Из результатов экспериментов, приведенных на рис. 5.12–5.14, видно, что в ЭДП с расширяющимся каналом значение  $q$  с ростом  $z$  вначале растет, достигает максимума и далее уменьшается. На этом участке ПС напряженность поля увеличивается, также растет и среднemasсовая энтальпия газа до некоторого предельного значения. Связав факт снижения  $q$  с уменьшением здесь величины градиента температуры, можно предположить, что скорость роста теплового радиуса ПС вдоль оси  $z$  достигает некоторых оптимальных для данного режима горения дуги значений и далее отстает от скорости роста радиуса канала РК.

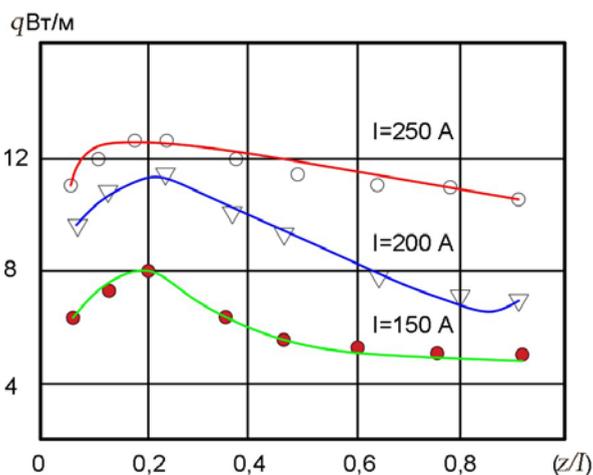


Рис. 5.14. Распределение тепловых потоков ЭДП с МЭВ

с разрядной камерой переменного радиуса и распределенным вдувом воздуха.

Длина канала  $l = 16$  см, радиус выходного канала  $R = 0,75$  см  $G = 1,6 \cdot 10^{-4}$  кг·с<sup>-1</sup>,  $G_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  кг·с<sup>-1</sup>

## 5.4. Плазмотроны переменного тока

Плазмотроны переменного тока промышленной частоты обладают существенными преимуществами по сравнению с генераторами постоянного тока – высоким КПД системы электропитания, отсутствием выпрямителей и возможностью плавного регулирования рабочего тока. Однако, поскольку при изменении полярности электродов и переходе напряжения через ноль происходит погасание разряда, необходимы специальные меры для обеспечения устойчивого горения дуги переменного тока (рис. 5.15).

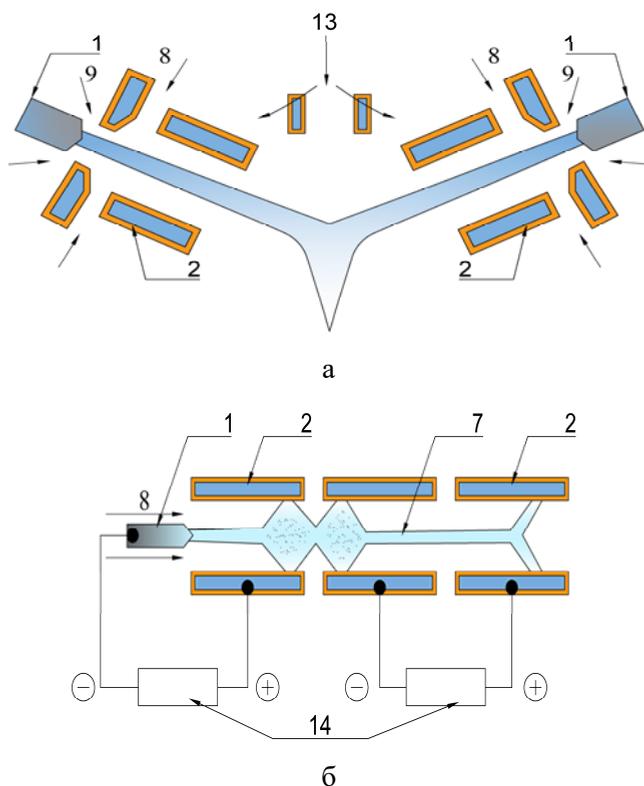


Рис. 5.15. Схемы плазмотронов переменного тока промышленной частоты

В соответствии со способом стабилизации электрической дуги можно выделить три типа плазмотронов переменного тока: со стабилизацией дуги электродами, с высокочастотным сопровождением и комбинированные (с использованием постоянного тока).

Наибольшее применение в промышленности нашли плазмотроны со *стержневыми электродами*, выполненными из тугоплавкого материала (чаще всего из графита). При использовании трехфазного тока обычно используются три электрода в общей камере, ввод плазмообразующего газа выполняется тангенциально.

Электроды размещаются достаточно близко друг к другу внутри разрядной камеры, причем постоянно поддерживается электропроводный слой газа, обеспечивающий стабильную работу плазмотрона при смене полярности. Известны конструкции электродугового генераторов с *электродами, распределенными по длине дугового канала*. Общая точка трансформатора подключена к стержневому электроду, а фазовые выводы – к трубчатым электродам. Аналогично выполняется трехфазное включение плазмотронов, имеющих три трубчатых электрода. Основной недостаток таких плазмотронов – большие тангенциальные пульсации параметров плазменной струи вследствие изменения длины дуги при смене полярности кольцевых электродов. Плазмтроны с *разрезным электродом* по схеме электропитания аналогичны описанным выше, но обладают большей устойчивостью. В отличие от других конструкций плазмотронов, в них затруднено использование соленоидов для быстрого перемещения пятна дуги по поверхности электрода, что сокращает срок службы.

В последнее время все более широкое применение находят плазмтроны *комбинированного типа*, в которых основной вклад мощности обеспечивается переменным током, а постоянный ток используется лишь для генерации плазменной струи малой мощности, предохраняющей основной разряд от погасания (так называемая *дежурная дуга*). Такие плазмтроны могут устойчиво работать в широких диапазонах изменения тока и расхода газа. Примером такого плазмтрона может быть конструкция, изображенная на рис. 5.15а, если к элементам 1 и 3 подключен источник переменного тока. Аналогично устроен комбинированный плазмтрон трехфазного тока. Другим примером комбинированного плазмтрона является конструкция, представленная на рис. 5.15б, в которой второй источник 14, подключенный к двум трубчатым электродам, заменен электропитанием переменного тока. В некоторых случаях к выходным электродам подключают как источник переменного, так и постоянного тока, что позволяет увеличить срок службы.

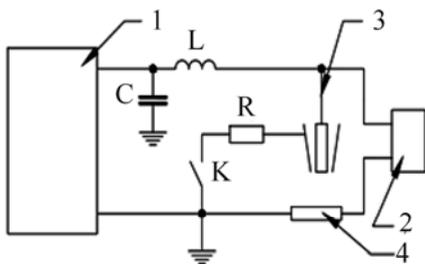
## 5.5. Пуск и питание электродугового плазмтрона

В плазменно-дуговых плазмтронах для возбуждения электрической дуги, как правило, используются три способа возбуждения разряда – закорачиванием или замыканием электродов, высоковольтным и высокочастотным пробоем и заполнением межэлектродного промежутка плазмой от вспомогательного источника плазмы.

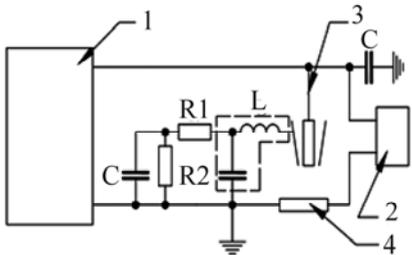
Зажигание разряда закорачиванием электродов осуществляется перемещением одного из основных электродов до касания с другим с последующим разведением электродов. Этот способ применяют для небольших плазмтронов, например, для плазмтронов микроплазменной сварки. Второй способ – перемещением дополнительного подвижного электрода до касания с основным с последующим их разведением. Этот вариант применяют для мощных плазмтронов, используя дополнительный электрод, который вводят в зазор с помощью приво-

да, а при зажигании разряда быстро выводят, в результате чего образуется вспомогательный разряд на один из основных электродов, который затем переходит на другой основной электрод. В качестве привода электрода используют электромагниты или пневматику.

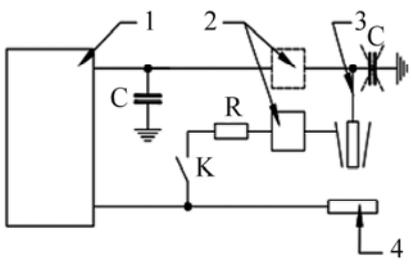
Для возбуждения электрической дуги высокочастотного осциллятора используются три схемы, изображенные на рис. 5.16а и б при параллельном подключении, а в при последовательном подключении осциллятора. Схема 5.16а требует применения защитного дросселя, она рассчитана на полный рабочий ток установки. В схеме на рис. 5.16б через дроссель  $L$  протекает ток только дежурной дуги, поэтому дроссель может быть рассчитан на небольшое значение тока. При последовательном включении осциллятора (рис. 5.16в) также возможно включение осциллятора как в цепь электрода, так и в цепь сопла. Преимущества и недостатки обоих вариантов те же, что и при параллельном включении.



а



б



в

Рис. 5.16. Схемы возбуждения электрической дуги

Емкость  $C$  во всех рассмотренных случаях служит для защиты источника питания от высокого напряжения осциллятора. При значительном удалении источника питания от плазмотрона рекомендуется устанавливать две защитные емкости – вблизи плазмотрона и непосредственно на зажимах источника питания.

Осциллятор рекомендуется размещать возможно ближе к плазмотрону для уменьшения уровня высокочастотных помех и предотвращения пробоя изоляции в цепях источника питания и схемы управления.

**Цепь дежурной дуги.** Для возбуждения тока по цепи электрод-сопло при зажигании дежурной дуги сопло через токоограничивающее сопротивление  $R$  (см. рис. 5 16а и в) подключается к заземленному полюсу источника питания. После возбуждения основной дуги ток в ней приближается к нулю. Для предотвращения образования двойной дуги цепь дежурной дуги необходимо разорвать с помощью контактора  $K$ . Однако может использоваться и режим работы с постоянно горящей дежурной дугой.

Возможно и применение изображенной на рис. 5. 16б схемы возбуждения дежурной дуги. В этом случае после пробоя промежутка электрод-сопло возникает импульс тока, обусловленный зарядом емкости  $C1$  через сопротивление  $R1$ . После заряда емкости ток дежурной дуги падает до нуля, и происходит разряд емкости через сопротивление  $R2$ . После разряда емкости производится вторичный пробой промежутка, и импульс тока повторяется. Амплитуду, длительность и частоту следования импульсов можно изменять с помощью  $C1$ ,  $R1$  и  $R2$ .

Использование подобной схемы позволяет увеличить амплитуду тока дежурной дуги без возрастания его среднего значения, т.е. увеличить надежность возбуждения основной дуги без роста термического воздействия на электрод и сопло плазмотрона.

**Источник питания (ИП)** плазменной установки должен иметь крутопадающую внешнюю статическую характеристику. Такая характеристика может быть обеспечена следующими типами источников питания: управляемыми дросселями насыщения, статическими (тиристорными или транзисторными) преобразователями с обратной связью по току, источниками питания на базе индуктивно-емкостных преобразователей. В отдельных случаях могут использоваться сварочные генераторы, трансформаторы с рассеянием, балластные реостаты.

**Выпрямители с дросселями насыщения (ДН)**, долгое время широко применявшиеся в установках для плазменной обработки, обладают хорошими регулировочными характеристиками, просты в обслуживании и надежны в работе.

Недостатками их являются низкий коэффициент мощности, значительные габариты и масса из-за большой массы дросселя насыщения. Не вполне удовлетворительны и динамические характеристики ДН, следствием чего являются броски тока при возбуждении дуги в ИП для плазменной резки. Используемое в этих ИП начальное ограничение тока подмагничивания ДН все же не позволяет полностью избавиться от бросков тока.

Источники питания с ДН в настоящее время практически вытеснены более экономичными, компактными и легкими статическими преобразователями – тиристорными выпрямителями и транзисторными преобразователями.

**Тиристорные выпрямители**, в которых для получения крутопадающей внешней характеристики используется обратная связь по току нагрузки, в настоящее время наиболее полно отвечают требованиям, предъявляемым к источникам питания установок для плазменной обработки. Высокие технико-экономические показатели, возможность получения любой желаемой формы внешней характеристики, широкий диапазон регулирования позволяют использовать тиристорные выпрямители для всех видов плазменной обработки. ВИП этого типа достаточно просто реализуются режимы плавного увеличения и уменьшения тока, импульсные режимы, что значительно расширяет и улучшает технологические возможности установок.

К числу недостатков тиристорных выпрямителей можно отнести большую величину пульсаций напряжения при глубоком регулировании. Уменьшение пульсаций за счет увеличения индуктивности сглаживающего дросселя приводит к ухудшению условий зажигания дуги. При повышенных требованиях к величине пульсаций можно рекомендовать применение двенадцатипульсных схем выпрямления, что, однако, вызывает значительное усложнение схемы и ухудшение экономических показателей выпрямителя.

В момент возбуждения дуги, когда сигнал обратной связи отсутствует, тиристорный выпрямитель фактически является нерегулируемым выпрямителем с жесткими характеристиками. При плазменной резке это приводит к появлению бросков тока длительностью в 60–360 электрических градусов (в зависимости от динамических свойств схемы управления) и амплитудой, в 3–8 раз превышающей номинальное значение рабочего тока. Борьба с этим явлением довольно сложно. Увеличение угла открывания тиристоров при возбуждении дуги приводит к снижению напряжения холостого хода и уменьшению вероятности возбуждения дуги.

**Источники питания на базе индуктивно-емкостных преобразователей** (ИЕП) также называют *параметрическими источниками тока*. В ИЕП используются резонансные свойства  $LC$  контура, позволяющие получить ИП с характеристикой, близкой к идеальному источнику тока (вертикальной характеристикой). Несмотря на то, что ИЕП имеют вертикальные характеристики, наиболее соответствующие требованиям плазменной технологии, они не получили широкого распространения из-за сложности регулирования тока. Практически ток в ИЕП может регулироваться только изменением питающего напряжения. Область применения ИЕП ограничивается плазменной резкой, которая, как уже упоминалось ранее, может производиться на двух-трех фиксированных значениях тока. Недостатком ИЕП также является необходимость использования силовых конденсаторов и дросселей.

**Транзисторные источники питания** имеют высокие технические характеристики. Поскольку транзистор является полностью управляемым полупроводниковым прибором и к тому же допускает высокую частоту коммутаций, транзисторные ИП позволяют получить любую форму внешней статической характеристики, идеально сглаженный ток и прекрасные динамические свойства, особенно то характерно для биполярных транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*-транзисторов). Однако такие источники относительно дороги.

Для обеспечения электродуговому плазматрону рабочего режима он должен быть подключен к системе газоснабжения и системе охлаждения тех элементов конструкции, на которых выделяется тепло.

### 5.6. Условия формирования плазменного столба в плазматроне

Условно столб дуги может быть разделен на три участка: начальный, цилиндрический и выходной (рис. 5.17).

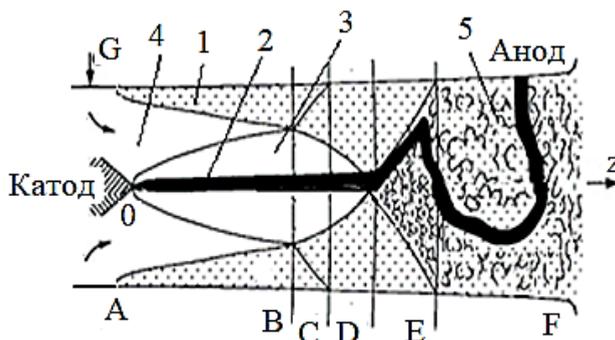


Рис. 5.17. Структура дуги и потока газа вдоль канала плазматрона:  
 1 – пограничный слой; 2 – дуга; 3 – тепловой слой дуги;  
 4 – невозмущенное течение; 5 – переходный участок течения

Стабилизированная дуга позволяет получить существенно большие максимальные температуры, чем свободно горящая дуга. На практике, за исключением особых случаев, не требуется достижение максимальных температурных значений. Наоборот, плазму электрической дуги желательно иметь при столь низкой температуре, насколько это не противоречит требуемым по условиям технологического процесса параметрам, в частности, требуемой энтальпии газовой струи на выходе из плазматрона. Поскольку излучение весьма сильно зависит от температуры, дуга малого диаметра с высокой температурой будет излучать большую мощность, чем дуга большего диаметра с меньшей температурой при той же средней энтальпии в плазматроне.

В [6, 7] было предложено описание процессов, протекающих в цилиндрическом канале плазматрона, оно выглядит следующим образом. Газ поступает в канал, взаимодействует с дугой, горящей между стержневым или торцевым ка-

тодом и цилиндрическим анодом, и вытекает через сопло, которым в простейшем случае может служить сам анод. Экспериментально, установлено, что небольшая закрутка при подаче газа в плазмотрон существенно не отражается на характеристиках дуги.

На участке канала  $A(0)-B$ , длина которого определяется местом встречи турбулентного пристенного пограничного слоя 1 с тепловым слоем 3 дуги 2, градиент температур в пристенном слое близок к нулю. Развивающийся на стенке пограничный слой газа не влияет на дугу и ее тепловой слой (область газа, прогретого дугой), дуга горит в ламинарном потоке. В сечении  $B$  границы теплового и пограничного слоев смыкаются, далее вниз по потоку начинается процесс передачи тепла от дуги пограничному слою и стенке. В зонах  $C$  и  $D$  происходит разрушение теплового слоя дуги. Начиная с сечения  $D$  столб дуги взаимодействует с турбулентным потоком газа. Под действием турбулентных пульсаций, которые существуют в пограничном слое, дуга начинает хаотически колебаться во времени и в пространстве. В зонах  $D-F$  происходит постепенный переход к установившемуся течению (переходный участок течения). В конце зоны  $E$  завершается формирование развитого турбулентного течения, которое характерно для зоны  $F$  и далее вниз по потоку до выходного электрода. Здесь структура токопроводящего столба дуги становится неопределенной, радиальные колебания выражены еще ярче, чем на переходном участке, заметнее процессы развития и отмирания токопроводящих каналов.

На начальном участке дуга постепенно расширяется до тех пор, пока ее «граница» встретится с холодным пограничным слоем, образующимся на стенке канала. Под «границей» в теории взаимодействия дуги с пристеночным пограничным слоем подразумевается поверхность, находящаяся на некотором расстоянии от дуги, где происходит резкое понижение температуры и вязкости плазмы.

При неизменном диаметре канала и расходе газа увеличение тока приводит к расширению «границы» дуги и, следовательно, к уменьшению длины начального участка; если же неизменны диаметр канала и ток дуги, то увеличение расхода газа ведет к уменьшению толщины пограничного слоя и, следовательно, к увеличению длины начального участка.

После встречи холодного пристеночного слоя с «границей» дуги последняя начинает подвергаться турбулентным возмущениям и разрушению, начинается интенсивное перемешивание потока, ведущее к выравниванию поля температур. Длина второго участка может составить десятки диаметров электрода. Амплитуда поперечных колебаний и их частота на этом участке нарастают вниз по потоку.

В плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги в начале второго участка происходит явление повторяющегося пробоя между столбом дуги и электродом. Это явление в литературе часто называется «шунтированием».

На этом участке растет напряженность электрического поля, что связано с интенсификацией теплообмена. Увеличивается также тепловой поток в электрод. Это наглядно видно на рис. 5.17.

Третий участок – зона полностью развитого турбулентного течения. В плазмотронах с гладкой поверхностью обнаружить этот участок трудно вследствие весьма протяженного второго участка, однако в плазмотронах с распределенной подачей газа в межсекционные зазоры он легко обнаруживается вследствие сильного сокращения предыдущих участков. Напряженность электрического поля здесь постоянна и в несколько раз выше, чем на первом участке.

Следует отметить, что такая картина справедлива лишь для струйных плазмотронов, в которых дуга горит в канале плазмотрона. В плавильных плазмотронах дуга горит в свободном пространстве и стабилизируется продольным потоком газа, большая часть которого подается не через плазмотрон, а засасывается на начальном участке дуги из окружающей его атмосферы.

Среднемассовая температура плазменной струи на выходе из плазмотрона составляет  $(4-6) \cdot 10^3$  К для двухатомных и многоатомных газов и  $(1-2) \cdot 10^4$  К для одноатомных газов. В зависимости от состава плазмообразующего газа, конструкции плазмотрона и его рабочих параметров КПД плазмотронов составляет 50–95%.

Характерной особенностью начального участка А–С (без приэлектродной области) является постоянство напряженности электрического поля  $E_n$  вдоль канала, столб дуги практически не имеет поперечных пульсаций. Относительная длина этого участка  $\bar{Z}_n = Z_n/d$  для цилиндрического канала с гладкой поверхностью рассчитывается по приближенной формуле

$$\bar{Z}_n = \frac{1,435 \text{Re}_d^{0,27}}{1 + 1,3 \cdot 10^{-3} \left( \frac{I}{d\sqrt{\mu h \sigma}} \right)^{1,1}}. \quad (5.9)$$

Для канала, образованного секциями (плазмотрон с МЭВ) и протоком небольшого количества газа через меж секционные зазоры, эта зависимость имеет вид

$$\bar{Z}_n = \frac{1,35 \text{Re}_d^{0,25}}{1 + 1,85 \cdot 10^{-3} \left( \frac{I}{d\sqrt{\mu h \sigma}} \right)^{1,2}}, \quad (5.10)$$

где  $\mu$ ,  $h$ ,  $\sigma$  – характерные значения динамической вязкости, энтальпии и электропроводности газа.

Зона течения, начинающаяся с сечения  $E$  (рис. 5.17), также характерна постоянством напряженности электрического поля  $E_t$ , но по величине превышает ее значение на начальном участке в несколько раз. В переходной зоне С–Е напряженность  $E_n$  монотонно возрастает в направлении течения газа, причем протяженность этой зоны может составлять несколько калибров. Этот рост  $E_n$  обусловлен как интенсификацией отвода тепла от дуги, так и увеличением ее фактической длины из-за искривления столба дуги на измеряемой базе.

Величина напряженности электрического поля дуги зависит от диаметра канала, расхода и давления газа, силы тока и ряда других определяющих параметров. Для примера на рис. 5.18 приведено экспериментально измеренное распределение  $E$  вдоль секционированного канала в плазмотроне с МЭВ (относительная длина МЭВ  $a = 20-25$ , рабочий газ – воздух,  $d = 0,02$  м,  $I = 120$  А).

На кривой четко просматриваются три характерные зоны. Первая из них (зона 1) соответствует постоянству напряженности поля – начальный участок. Зона 2 характеризуется ростом напряженности вдоль канала – переходный участок. За ней следует зона 3 с постоянным значением  $E$  при неизменных расходе газа, давлении и диаметре канала – участок развитого турбулентного течения.

Тепловой поток в стенку канала  $Q$  (см. рис. 5.18) на начальном участке практически постоянен и определяется в основном излучением дуги  $Q_{л}$ . Затем он начинает возрастать, так как к потоку излучения добавляется тепловой поток, определяемый конвективным теплообменом и теплопроводностью.

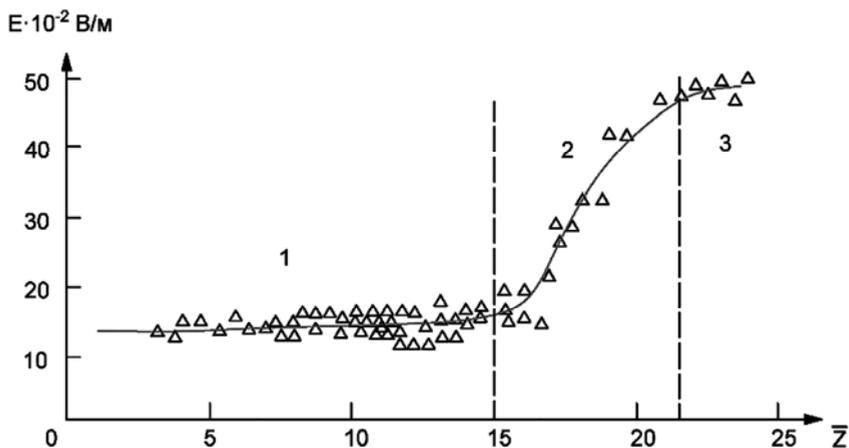


Рис. 5.18. Распределение напряженности поля по длине канала

При заданных значениях расхода газа, давления и других определяющих параметрах повышение энтальпии нагреваемого газа для плазмотронов с уступом возможно только за счет увеличения тока дуги. Но при этом возрастает и скорость

разрушения (эрозия) электродов. Схема же плазмотрона с МЭВ позволяет регулировать мощность разряда с помощью других свободных параметров, таких как длина дуги и напряженность электрического поля.

Однако, если не принять специальных мер, как происходит в плазмотронах с расширяющимся каналом, то суммарные тепловые потоки в стенки разрядной камеры могут быть значительно большими, так как на данном участке (турбулентного течения) быстро достигается предельное значение тепловых потерь (локальный тепловой КПД равен нулю). Так же эффективным средством снижения тепловых потерь является вдув части рабочего газа в межсекционные зазоры или через пористую вставку.

Сделанный анализ позволяет заключить, что обязательным условием стабильности ламинарной струи на выходе плазмотрона является отсутствие пристеночного потока «холодного» газа. Все выходное сечение разрядного канала или сопла струйного плазмотрона должна заполнять ламинарная плазменная струя, формируемая столбом электрической дуги.

Если величина критерия Пекле  $Pe < 250$  [12], то преобладание в слое газа между столбом и стенками разрядного канала процесса молекулярной теплопроводности над конвективным переносом тепла позволяет принять условие для расчета температуры газа в слое в виде

$$T_r = \Lambda^{-1} S_r(T) \quad S_r = \frac{S(T_{sa}) - S(T_w)}{\ln \left( \frac{S(T_{sa})}{S(T_w)} \right)}, \quad (5.11)$$

где  $T_w$  – температура газа на входе в разрядный канал ( $T_w \approx 700$  К);  $T_{sa}$  – температура поверхности столба дуги;  $S_r$  – функция теплопроводности газа;  $\Lambda^{-1}$  – обозначение обратной функции.

В соответствии с теорией пограничного слоя толщина пограничного слоя на стенке разрядного канала  $\Delta_m$  прямо пропорциональна вязкости газа в слое сжатия

$$\Delta_m \sim \sqrt{\eta}(T_r). \quad (5.12)$$

В этой связи, степень сжатия дуги, необходимая для запираания газа в пристеночном слое будет определяться условием

$$\delta_r = \frac{2r_a}{d_e} \sim \frac{1}{\Delta_r}; \quad \Delta_r = \frac{d_e}{2}(1 - \delta_r) < \Delta_m, \quad (5.13)$$

где  $r_a$  – радиус столба дуги;  $\Delta_r$  – толщина пристеночного слоя между стенкой разрядного канала и поверхностью столба дуги.

Иными словами, столб дуги должен заполнять всё выходное сечение разрядного канала, т.е. дуга в выходном сечении канала должна находиться в режиме сжатия стенками. Обеспечить это условие при наличии даже малых потоков массы газа в канале чрезвычайно трудно, так как степень сжатия дуги стенками  $\delta_r$  должна быть не меньше такой величины, при которой толщина слоя сжатия  $\Delta_r$  будет значительно меньше толщины динамического пограничного слоя  $\Delta_m$  на стенке разрядного канала. В этом случае высокая вязкость газа в слое сжатия, обусловленная близостью изотермы  $T_{sa}$ , полностью запирает сечение слоя для любого даже малого потока массы газа за пределами столба сжатой стенками дуги. Весь поток массы газа на выходе разрядного канала захватывается столбом дуги, формируя, тем самым, на выходе канала устойчивую ламинарную струю плазмы. Такая струя, затопленная в открытом пространстве газа атмосферного давления, отличается высокой проникающей способностью и малой скоростью диссипации импульса из-за высокой вязкости газа на границе струи. Поверхность такой затопленной струи ведет себя как непроникающее для окружающего газа «твердое» тело.

Таким образом, если экспериментом установлена величина степени сжатия дуги, горячей, например, в аргоне  $_{Ar}\delta_r$ , при которой обеспечивается устойчивость ламинарной струи на выходе струйного плазмотрона, то для иного газа необходимая степень сжатия дуги может быть рассчитана по формуле

$$_{gaz}\delta_r \approx 1 - \left(1 - _{Ar}\delta_r\right) \frac{\sqrt{\eta(T_r)_{gaz}}}{\sqrt{\eta(T_r)_{Ar}}}. \quad (5.14)$$

Наиболее известной из опубликованных работ, в которой была получена аргоновая ламинарная струя высокой стабильности и проникающей способностью, является работа японских ученых [14]. В этой работе приведены результаты исследования электрических и тепловых характеристик струйного плазмотрона, генерирующего устойчивую ламинарную струю длиной более 0,5 м. Разрядный канал плазмотрона имел диаметр  $d_e = 6$  мм, ток дуги, при котором достигался устойчивый режим генерирования ламинарной струи, составлял  $I = 162$  А. Рассчитанная для него степень сжатия дуги в случае работы в аргоне  $_{Ar}\delta_r = 0,963$ .

Уменьшение  $d_e$  ведёт к уменьшению диаметра ламинарной плазменной струи и к уменьшению допустимого значения  $\delta_r$ . Если сохранить допустимое  $q_6$ , тогда уменьшение  $d_e$  ведёт к ухудшению устойчивости ламинарной струи.

В таблице 5.1 приведены результаты расчетов параметров сжато дуги, горячей в аргоне.

Таблица 5.1

### Параметры сжатой дуги, горящей в аргоне

Параметр	Диаметр канала $d_e$ , мм						
	10	8	6	5	4	3	2
$I_N$ , А	346	246	164,5	128,5	97,5	69,5	44,0
$q_0$ , Вт/мм <sup>2</sup>	8,825	8,78	9,39	10,02	11,34	13,8	18,96
$\lambda q_0$ , Вт/мм <sup>2</sup>	4,2	5,15	7,72	7,85	9,64	12,56	18,16
$\varepsilon q_0$ , Вт/мм <sup>2</sup>	4,63	3,63	2,67	2,17	1,70	1,24	0,8
$T_a$ , 10 <sup>3</sup> К	12,8	12,76	12,7	12,64	12,6	12,54	12,46
$E$ , В/м	801,3	897,3	1076,2	1224,4	1461,2	1871,3	2707,4

На основе этой таблицы можно рассчитать рабочий ток  $I_N$  плазмотрона в зависимости от  $d_e$ , воспользовавшись выражением

$$I_N = -148,6 + \frac{3092,9}{1 + \exp\left(-\frac{d_e - 22,61}{7,6}\right)}, \text{ А,}$$

выбрать значение потока массы газа, воспользовавшись выражением

$$\dot{m}_{\max} \approx 935,4 \cdot d_e \cdot \eta(T_w), \text{ кг/с,}$$

где  $d_e$  – в м,  $\eta$  – в Па·с.

Следующим важным условием получения требуемого КПД является

$$l_h < l_e \quad (5.15)$$

где  $l_e$  – длина разрядного канала;  $l_h$  – длина зоны нагрева газа. Зона сжатия дуги стенками на конце разрядного канала должна быть достаточно длинной ( $l_h < z < l_e$ )

$$l_{cs} < (l_e - l_h) \approx d_e. \quad (5.16)$$

### 5.7. Модель плазменного генератора с ламинарной плазменной струей

Анализ условий генерирования ламинарной плазменной струи позволяет разделить канал на две части, как показано на рис. 5.19, где 1 – катод, 2 – анод, 3 – секции МЭВ, 4 – струя ламинарная плазмы, 5 – направление движения лами-

нарной плазмы, 6 – направление движения газа в канале, 7 – область турбулентной плазмы; непрерывной линией показано распределение температуры газа; пунктирная линия – распределение температуры плазмы. Принимаем, что длина столба дуги  $l_a$  равна длине канала  $l_e$ . Отсюда получается падение напряжения на дуге

$$U_a = U_{AK} + E_{con} + E_h l_h + E_{CS} (l_e - l_h), \quad (5.17)$$

где  $E_h$ ,  $E_{CS}$  – средние напряженности электрического поля на отрезках нагрева газа и сжатия;  $U_{AK}$  – сумма приэлектродных падений напряжения;  $U_{con}$  – падение напряжения в конусной части дуги.

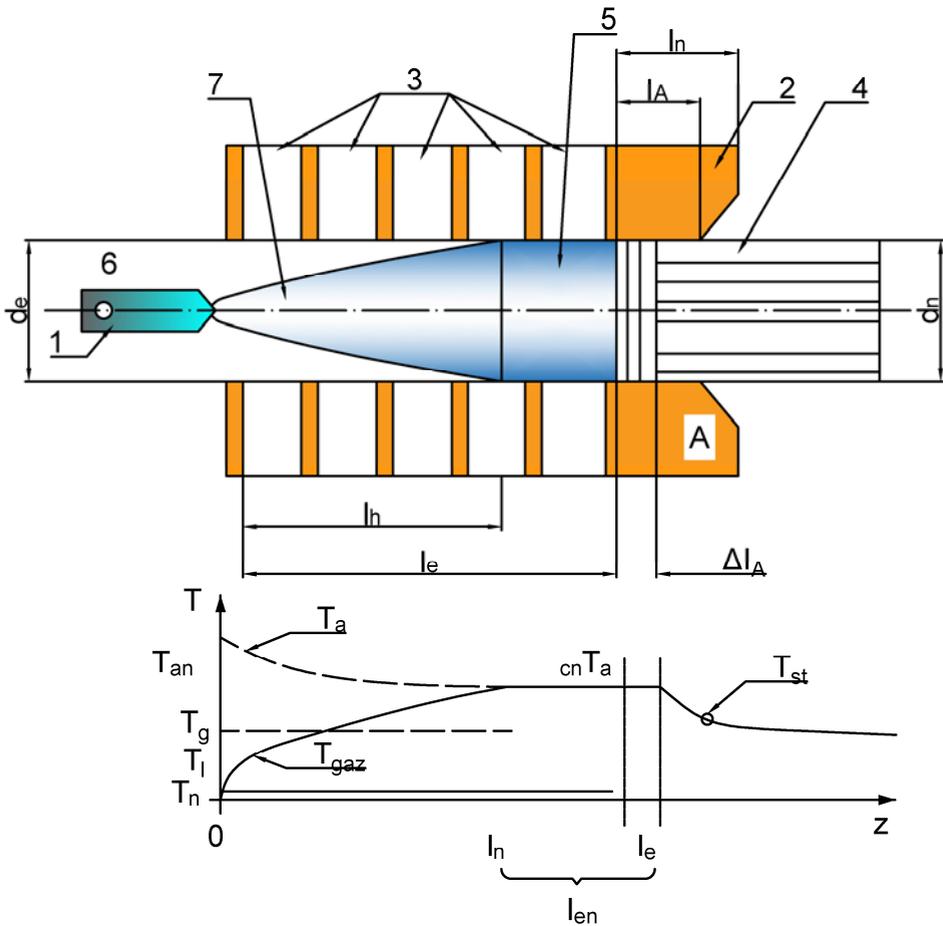


Рис. 5.19. Структура течения газа и распределения средней температуры в канале

Уравнение баланса мощности струи  $P_{st}$  на выходе имеет вид:

$$P_{st} = h({}_{st}T_a) \dot{m} - (P_w)_n + IU_A = h({}_{st}T_a) \dot{m} - {}_n q_w \pi d_n l_n, \quad (5.18)$$

где  ${}_n q_w$  – средняя плотность теплового потока в стенке канала сопла-анода;  $l_n$  – длина цилиндрического канала анода-сопла (рис. 5.20);  $d_n$  – диаметр канала анода-сопла;  ${}_{cs}T_a$  – средняя температура столба дуги в зоне сжатия;  $h$  – удельная энтальпия газа. Тепловой КПД плазмотрона можно определить как

$$\eta_t = \frac{\dot{m}[h(T_{st}) - h(T_{in})]}{IU_A} \approx \frac{\dot{m}h(T_{st})}{IU_A} = \frac{P_{st}}{IU_A}. \quad (5.19)$$

Мощность потерь тепла, уносимого водой в разрядном канале можно вычислить, если известны напряжение  $U_a$  и тепловой КПД  $\eta_t$  плазмотрона:

$$(P_w)_h = IU_a (1 - \eta_t) - {}_n q_w \pi d_n l_n - IU_{AK}, \quad (5.20)$$

где  $U_{AK}$  – сумма приэлектродных падений напряжения. С учетом ф. (5.15) и (5.16) уравнение (5.20) можно записать как

$$(P_w)_h = IU_a - (P_{st} + {}_n q_w \pi d_n l_n) - IU_{AK} \quad (5.21)$$

или

$$(P_w)_h = \pi d_e {}_n q_w l_n = IU_a - (P_g)_e - IP_{AK}, \quad (5.22)$$

где  $(P_g)_e$  – тепловая мощность плазмы в выходном сечении канала ( $z = l_e$ )

$$(P_g)_e = \dot{m}[h({}_{cs}T_a) - h(T_{in})] \approx \dot{m}h({}_{cs}T_a). \quad (5.23)$$

Согласно структуре дуги в рассматриваемом канале мощность потерь тепла  $P_w$ , уносимого водой

$$P_w = \pi d_e ({}_n q_w l_n + {}_{cs} q_w (l_e - l_h)), \quad (5.24)$$

где  ${}_h q_w$  – средняя плотность теплового потока на поверхности стенки разрядного канала в зоне нагрева газа.

Для описания процесса теплопередачи от газа к стенкам разрядного канала можно использовать критериальное число Стентона [15]

$$St = C_l Re^{-0.5} Pr^{-0.67}, \quad (5.25)$$

$$St = \frac{Nu}{Pe} = \frac{\alpha_w}{c_p (T_g) \rho (T_g) v}, \quad (5.26)$$

где  $Pe$  – число Пекле;  $Pr$  – число Прандтля;  $Nu$  – число Нуссельта;  $c_p$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\alpha_w$  – коэффициент теплопередачи от газа к стенкам разрядного канала в зоне нагрева дугой  $0 < z < l_h$ ;  $v$  – средняя скорость течения газа

$$v = \frac{4\dot{m}}{\pi d_e^2 \rho (T_g)}. \quad (5.27)$$

В первом приближении можно принять  $C_l = 1$ . Величина  $T_g$  является среднemasсовой температурой газа в зоне нагрева  $0 < z < l_h$

$$T_g = \frac{{}_{cs}T_a - T_r}{\ln \left( \frac{{}_{cs}T_a}{T_r} \right)}, \quad (5.28)$$

где  ${}_{cs}T_a$  – температуры плазмы в зоне сжатия дуги ( $l_e - l_h$ ). Значение средней плотности теплового потока на поверхности стенки разрядного канала в зоне нагрева газа определяется излучением плазмы столба дуги. Выполнение условия оптически тонкого слоя позволяет записать

$$({}_{\varepsilon}q_w)_h = \frac{(p_{\varepsilon})_h}{\pi d_e} = \frac{(r_e^2 p'_{\varepsilon}(p_{\lambda}))_h}{\pi d_e}, \quad (5.29)$$

где  $p_{\varepsilon}$ ,  $p_{\lambda}$  – линейные плотности мощности излучения и теплопроводности. Значение теплового потока излучения  ${}_{\varepsilon}q_w$ , в зоне сжатия дуги ( $l_e - l_h$ ) можно рассчитать по формуле

$$({}_{\varepsilon}q_w)_{cs} = \frac{(p_{\varepsilon})_{cs}}{\pi d_e} = \frac{(r_e^2 p'_{\varepsilon}(p_{\lambda}))_{cs}}{\pi d_e}. \quad (5.30)$$

Суммарное среднее значение плотности теплового потока на поверхности стенок разрядной камеры в зоне нагрева  $0 < z < l_h$  может быть вычислена из уравнения

$$\begin{aligned} (q_w)_h &= (\varepsilon q_w)_h + (\lambda q_h)_h = \\ &= \frac{(r_c^2 p'_\varepsilon(p_\lambda))_h + (p_\lambda)_h - [h(T_{cs}) - h(T_r)] \dot{m}}{\pi d_e l_h}. \end{aligned} \quad (5.31)$$

Суммарное значение плотности теплового потока на поверхности стенки разрядного канала в зоне сжатия дуги  $(l_e - l_h)$  может быть вычислена по формуле

$$(q_w)_{cs} = (\varepsilon q_w)_{cs} + (\lambda q_w)_{cs} = \frac{(r_c^2 p'_\varepsilon(p_\lambda))_{cs} + (p_\lambda)_{cs}}{\pi d_e}. \quad (5.32)$$

Тогда плотность теплового потока на поверхности столба, вызванного теплопроводностью плазмы в зоне сжатия дуги  $(l_e - l_h)$

$$(q_{Sa})_{cs} = \frac{(p_\lambda)_{cs}}{2\pi(r_c)_{cs}} = \frac{S(T_{Sa})K_S(T_{Sa})}{(r_c)_{cs} [\ln(0,5d_e) - \ln((r_c)_{cs})]}. \quad (5.33)$$

Среднее значение этого параметра в зоне нагрева  $0 < z < l_h$  может быть вычислено по формуле

$$(q_{wSa})_h = \frac{(p_\lambda)_h}{2\pi(r_c)_h} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{I^2}{(r_c)_h^3 \tilde{g}(p_\lambda)} - (r_c)_h p'_\varepsilon(p_\lambda) \right). \quad (5.34)$$

Пусть известно значение плотности мощности  $(p_\lambda)_h$ , рассеиваемой за счет теплопроводности плазмы. В этом случае среднее значение радиуса столба  $(r_c)_h$  в зоне нагрева газа можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} (r_c)_h &= \sqrt{0,25 \left[ \frac{(p_\lambda)_h}{p'_\varepsilon((p_\lambda)_h)} \right]^2 + \frac{I^2}{p'_\varepsilon((p_\lambda)_h) \tilde{g}((p_\lambda)_h)} -} \\ &\quad - 0,5 \frac{(p_\lambda)_h}{p'_\varepsilon((p_\lambda)_h)}, \end{aligned} \quad (5.35)$$

а среднюю напряженность электрического поля  $E_h$  в этой зоне по формуле

$$E_h = \frac{0,5(p_\lambda)_h}{I} + \left\{ \left( \frac{0,5(p_\lambda)_h}{I} \right)^2 + \frac{p'_\varepsilon((p_\lambda)_h)}{\tilde{g}((p_\lambda)_h)} \right\}^{0,5}, \quad (5.36)$$

где  $\tilde{g}$ ,  $\tilde{p}_\varepsilon$  – универсальные функции электропроводности и излучения [16].

Наиболее интересным является предельный режим распада ламинарной струи на выходе канала сопла. Это явление обнаружено экспериментально [5.14] при течении аргона в канале с диаметром  $d_e = 6$  мм и длиной  $l_e = 23$  мм. Ток дуги составлял  $I = 162$  А. Оптимальный режим со струей  $L_{st} = 525$  мм был получен с потоком объёма на входе  $\dot{v} = 8,4$  л/мин и числом Рейнольдса  $Re(T_e) = 1191$ . Потеря устойчивости возникает при  $Re(T_{in}) = 1360$ . Критический режим определяет граничное условие

$$l_h = l_e. \quad (5.37)$$

Рассчитанные параметры столба в режиме сжатия дуги следующие:

$$\begin{aligned} \delta_r &= 0,963; \quad (T_{Sa})_{cs} = 6094,1 \text{ К}; \quad (q_{Sa})_{cs} = 6,48 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}; \quad {}_{cs}T_a = 12655,6 \text{ К}; \\ (\lambda q_w)_{cs} &= 6,58 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}; \quad (\epsilon q_w)_{cs} = 2,61 \frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2}; \\ (p_\epsilon)_{cs} &= 49,24 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}; \quad (p_\lambda)_{cs} = 124,13 \frac{\text{кВт}}{\text{м}}; \quad E_{cs} = 1070,2 \frac{\text{В}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

В критическом режиме распада струи [13] напряжение дуги  $U_a = 45,0$  В, а тепловой КПД  $\eta_t = 36,2\%$  и мощность потока плазмы на выходе сопла  $P_{st} = 2,64$  кВт. Тепловой поток соответствующий падению напряжения в анодном слое дуги составляет

$$P_A = IU_A = (P_w)_n - \pi d_e (q_w)_{cs} l_A. \quad (5.38)$$

В таблице 5.2 помещены вычисленные значения электрических и тепловых параметров, а в таблице 5.3 помещены результаты расчета граничных параметров разрядного канала длиной отрезка нагрева газа  $l_h$ , относительной длины нагрева  $l_h/l_e$  и сжатия дуги  $l_{cs}/d_e$ .

Таблица 5.2

**Параметры генератора ламинарной струи плазмы аргона  
( $d_e = 6$  мм,  $I = 162$  А)**

Параметр	Поток объёма аргона $\dot{v}$ , л/мин			
	9,6	8,4	7,2	6,0
$\dot{m}$ , г/с	0,2854	0,2497	0,214	0,1784
$U_a$ , В	45,0	44,2	43,4	42,3
$\eta_t$ , %	36,3	32,2	28,4	22,6
$(P_w)_n$ , кВт	1,67	1,472	1,24	1,15
$P_A$ , кВт	0,804	0,605	0,374	0,283
$U_A$ , В	5,0	3,74	2,31	1,74
$l_A$ , мм	6,15	5,0	3,67	3,14

**Рассчитанные параметры разрядного канала  
( $d_e = 6$  мм,  $I = 162$  А)**

Параметр	Поток объёма аргона $\dot{v}$ , л/мин			
	9,6	8,4	7,2	6,0
$\dot{m}$ , г/с	0,2854	0,2497	0,214	0,1784
$U_a$ , В	45,0	44,2	43,4	42,3
$\eta_t$ , %	36,3	32,2	28,4	22,6
$l_h$ , мм	23,0	19,8	16,7	13,66
$l_h/l_e$	1	0,86	0,73	0,6
$(l_e - l_h)/d_e$	0	0,53	1,05	1,56

Уменьшение энергии струи на выходе и уменьшение потока массы газа ведет также к ускоренному распаду струи. Когда поток объёма газа достигает минимального значения ( $\dot{v} = 6,0$  л/мин), тогда длина ламинарной струи на выходе уменьшается ( $L_{st} = 475$  мм) в сравнении с оптимальной ( $L_{st} = 525$  мм).

### **5.7.1. Принцип действия и конструкции плазменно-дуговых печей**

Сложная ступенчатая структура нагрева металла в процессе плавки в ПДП обеспечивает следующие особенности нагрева дугой:

- интенсивность и скорость плавления металла определяется уровнем мощности излучения дугой;
- конвективный нагрев струями плазмы и плазмообразующего газа обеспечивает объемный характер нагрева шихты и способствует интенсификации процесса передачи тепла от дуги к ванне жидкого металла на подине печи;
- наличие струи плазмообразующего газа, омывающей столб дуги, способствует её стабилизации в плавильном пространстве и выравнивает её, а также стабилизирует условия теплообмена дуги с окружающей средой вдоль длины дуги.

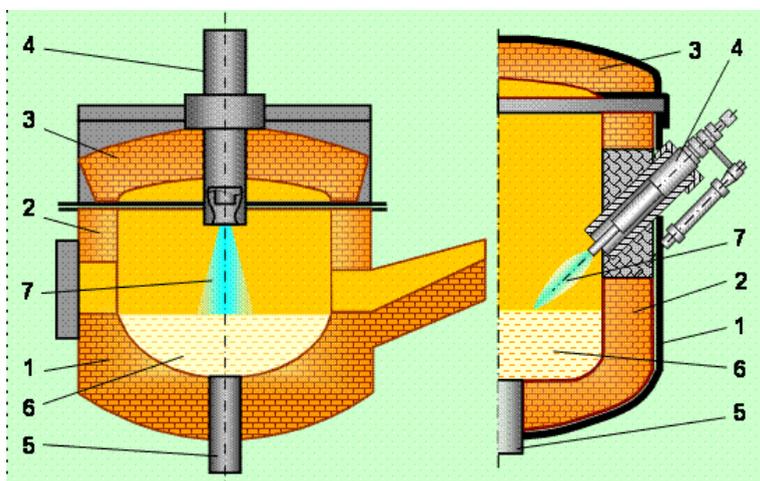
Плавка металлов в плазменных печах аналогична вакуумно-дуговой плавке с не расходуемым вольфрамовым электродом. Однако плазменная дуга имеет существенные преимущества перед вакуумной дугой: лучшая жесткость и стабильность дуги, большая длина дуги, предохранение металла и вольфрамового электрода от загрязнений, более высокое напряжение и мощность.

В отличие от вакуумной, индукционной, дуговой и электронной плавки при плавке в плазменно-дуговых печах наблюдается меньшее испарение редких компонентов расплава, а применение плазмотронов позволяет получить высокие легко регулируемые температуры и решить проблему стабилизации и регулирования параметров процесса.

Состав плазменной струи может задаваться по-разному, что позволяет поддерживать в печи практически любую атмосферу. Поскольку парциальное давление кислорода, водорода и азота плазменной печи, работающей на инертном газе, невелики, то условия дегазации жидкого металла в плазменно-дуговых печах приближаются к условиям дегазации в вакуумных печах, оборудованных сложными и дорогостоящими вакуумными системами.

Выплавка и переплав металлов в плазменно-дуговых печах (ПДП) дают продукты, качество которых гораздо выше, чем у продуктов плавки в традиционных печах, в том числе и в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), и приближается к качеству продуктов плавки в вакуумных печах. В качестве плазмообразующего газа возможно использовать аргон, азот, водород и их смеси. Применение в ПДП плавильных плазмотронов, работающих с аргоном, обеспечивает ведение плавки с минимальными потерями дорогостоящих легирующих элементов, что облегчает прогнозирование в процессе плавки химического состава получаемого сплава.

Плазменные и дуговые печи могут быть двух типов: плавильная печь с огнеупорной футеровкой и печь для переплава с водоохлаждаемым кристаллизатором (глухим или вытягиванием слитка). При выплавке металла в плазменной дуговой печи с огнеупорной футеровкой (рис. 5.20) форма печи и материал огнеупорной футеровки идентичны форме и материалу обычной дуговой печи.



**Рис. 5.20. Схема плазменной печи с керамическим тиглем:**  
 а – с одним плазмотроном в своде; б – с плазмотронами,  
 установленными в стенках: 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – свод;  
 4 – плазмотрон; 5 – подовый электрод;  
 6 – переплавляемый металл; 7 – плазменная дуга

Камера печи, из которой выкачен воздух, заполняется вытекающим из плазмотрона 4 газом, и после достижения определенного давления начинается процесс плавки.

Плазменная дуга 7 вначале процесса плавки проплавляет в шихте узкий канал и стекающий вниз жидкий металл скапливается в подине ванны, после чего расплавляется весь металл. Дегазация и рафинирование металла особенно интенсивно происходят на поверхности ванны в месте контакта жидкого металла 6 с высокотемпературной струёй плазменного потока 7. Для плавки применяют плазмотроны постоянного и переменного токов различных мощностей. При работе на постоянном токе, обычно используется прямая полярность подключения электродов (отрицательный полюс – катод). Характеристики промышленные печей емкостью 5, 10, 30 т – приведены в табл. 5.4. При запуске печи первичная дуга зажигается осциллятором между катодом и расплавом в потоке плазмы. Длина дуга, напряжение на ней определяется размерами и конструкцией печи.

Таблица 5.4

### Характеристики промышленных плазменно-дуговых печей

Емкость ПДП, т	3	6	12	30
Мощность трансформатора, МВА	3,28	8,95	2×8,95	3×8,95
Мощность преобразователя, МВА	2,9	8,25	2×8,25	3×8,25
Число плазмотронов	1	1	2	3 +1 запасной
Максимальный ток плазмотрона, А	6300	10 000	10 000	10 000
Максимальное выпрямленное напряжение, В	460	825	825	825
Диаметр ванны печи на уровне поверхности, м	2,1	2,27	2,74	4,4
Глубина ванны от порога рабочего окна, м	0,4	0,425	0,555	0,44
Удельный расход электроэнергии на расплавление шихты, кВт·ч/т	900	700	650	600
Суммарный расход аргона, м <sup>3</sup> /ч	10	15	30	60
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	45	65	100	167

В ПДП вместимостью 12–30 тонн используются два-четыре плазмотрона, которые устанавливаются в либо своде, либо в стенках печи. При наклонном расположении плазмотронов снижаются тепловые потери через корпус плазмотрона (в 2–3 раза) и повышается тепловой КПД ПДП, но при этом увеличивается тепловая нагрузка на футеровку печи под плазмотроном.

В отличие от ДСП, в ПДП плавление металла в ванне происходит в режиме длинной дуги. Это связано с тем, что плазмотрон из-за ограничения потерь тепла с водой находится в положении, когда большая часть его корпуса находится в отверстии свода и вне печи. Длина дуги в плавильном пространстве печи достигает величины 0,8–1,5 м в зависимости от емкости ванны печи. При работе печи длина дуги поддерживается постоянной и близкой к оптимальному значению, при которой энергетические и технологические показатели плавки наиболее эффективны.

Ответственным элементом конструкции любой ПДП является подовый электрод 5, расположенный в подине печи. Обычно используются подовые электроды – аноды трех конструктивных исполнений: стержневого, многоштыревого и пластинчатого. Подовые электроды пластинчатого типа наиболее эффективны для перемешивания жидкого металла. Они позволяют проводить восстановление пода печи на поврежденных участках при ремонте. Подовые электроды стержневого типа обладают повышенной стойкостью и возможностью быстрой замены. Возможно исполнение их с водяным охлаждением.

Конструкция рабочего органа ПДП – плазмотрона уже приводилась выше (см. рис. 5.8), но разобрать её детальней в данном случае уместно.

Водоохлаждаемый электрододержатель размещен во внутренней полости корпуса плазмотрона и надежно изолирован от сопла. Катод закреплен в электрододержателе с помощью прессовой посадки, пайки, резьбового или цангового соединения. Как правило, сопло представляет собой отдельный узел и крепится на водоохлаждаемом корпусе плазмотрона. С помощью сопла происходит формирование потока газа в катодной области дуги. Сопло организует направленное продольное течение газа в столбе дуги, обеспечивая стабилизацию дугового разряда и конвективный перенос тепла от плазмы к металлической ванне. Оно служит также стартовым электродом – анодом при возбуждении дуги в электропечи с помощью осциллятора. Вид ВАХ дуги зависит от рода и расхода газа, длины дуги, геометрических размеров плазмотрона (диаметра сопла и катода, заглубления катода в сопло), материала электрода, давления в рабочем пространстве печи и других параметров.

Измерения показали, что чем длиннее внутренний столб дуги плавильного плазмотрона, тем выше температура в дуге и температура плазменного потока за пределами сопла плазмотрона. Однако следствием увеличения длины внутреннего столба в канале сопла плавильного плазмотрона является увеличение разности электрического потенциала по длине внутреннего столба. Высокие температуры потока газа и малая толщина пограничного температурного слоя вблизи холодных стенок сопла могут способствовать появлению электрического пробоя газового промежутка между поверхностью дуги и стенками канала сопла [13]. Таким образом, с увеличением тока дуги вероятность пробоя возрастает. При возникновении электрического пробоя внутренний столб дуги шунтируется стенками сопла, и электрическая дуга распадается на две части, т.е. образуется двойная дуга. В этом случае интенсивность нагрева снижается, так как исчезает сжатие дуги стенками теплообменного канала сопла плазмотрона. Кроме того, в результате привязки дуги к стенкам сопла существенно возрастает тепловая нагрузка на само сопло.

Скорость эрозии (разрушения) легированного вольфрамового катода при работе с аргонem, азотом, водородом или их смесями составляет  $10^{-10}$ – $10^{-12}$  кг/с. В мощных промышленных плавильных плазмотронах используют только резьбовое или цанговое соединение катода с электрододержателем. Вода в электродо-

держатель поступает через центральный канал диаметром 10–14 мм при давлении не ниже 0,2 МПа, а отводится по кольцевому зазору между внутренней и внешней концентрическими трубками. Ширина зазора выбирается от 1,5 до 3,0 мм. Сопло плазмотрона 4 организует направленное продольное течение газа в области столба дуги в виде струи, затопленной в плавильном пространстве ванны печи. Сопло, обычно, является сварным. Охлаждение корпуса и сопла осуществляется раздельно.

При токе до 10 кА расход воды на охлаждение сопла составляет  $(2-3) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении 1,2–1,5 МПа. При выходе из строя сопло вместе с корпусом плазмотрона заменяются новыми. Контактные щеки токоподвода непосредственно закреплены на катододержателе в верхней части плазмотрона.

При работе в окислительной среде вольфрамовый катод необходимо защищать завесой нейтрального газа. Диаметр вольфрамового катода выбирается из расчета средней плотности тока в сечении катода  $j_k = 5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ . Для увеличения срока службы катода при токах свыше 5 кА иногда используют полые вольфрамовые катоды с внутренним сквозным осевым отверстием диаметром 6,4–9,5 мм, через которое прокачивается незначительное количество аргона. В этом случае конструкция катододержателя становится несколько сложнее. Дополнительный поток массы аргона, подаваемого в полость катода, относится к суммарному общему потоку массы аргона в плазмотроне как 1:3.

Из опыта эксплуатации различных вариантов металлургических плазмотронов можно сформулировать ряд рекомендации, которые поясняются рис. 5.21. Длину вольфрамового катода выступающего из катододержателя рекомендуется выбирать в пределах  $H = (2-3) \cdot d_k$ . Важным параметром плазмотрона является длина сопла  $l_d$ , которая определяет режим истечения струи в плавильное пространство печи. Опыт показывает, что отношение длины сопла к его диаметру  $l_d/d_k$  целесообразно выбирать равным  $l_d/d_k = 2$ . Опыт разработки и эксплуатации ПДП позволяет рекомендовать следующие геометрические параметры плазмотрона:

$$H = (1,2 - 4,0)d_k; l_d = (0,3 - 0,6)d_k; d_d = (1,1 - 1,4)d_k. \quad (5.39)$$

При небольших токах плазмотрона (не более 2000 А) для увеличения эффективности нагрева и плавления металла катод можно заглублять внутрь сопла. В этом случае  $\Delta$  становится отрицательным и обычно принимает значения не менее  $0,2d_k$ . При больших токах необходимо катод выпускать за пределы сопла. В этом случае  $\Delta$  принимает положительное значение тем большее, чем больше величина рабочего тока плазмотрона. При токе до 6000 А  $\Delta$  принимается равным  $0,2d_k$ , а при токе 10 000 А значение  $\Delta$  увеличивается до величины  $0,4d_k$ .

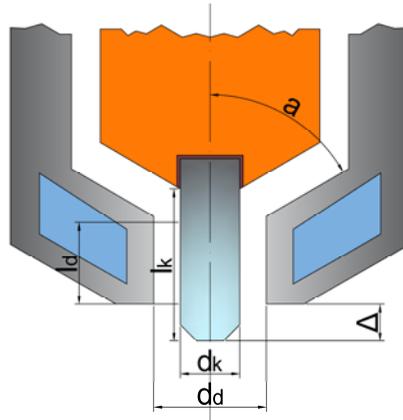


Рис. 5.21. Общие геометрические параметры плазмотрона

Управление мощностью дуги в ПДП путем изменения ее длины перемещением плазмотрона в плавильном пространстве печи неэффективно. Чрезмерное заглубление плазмотрона в плавильное пространство печи приводит к значительному увеличению потерь тепла с водой, охлаждающей металлический корпус плазмотрона. В ПДП механизм перемещения плазмотрона, обычно гидравлический, является только дополнительным устройством управления режимом работы печи, например, в процессе зажигания дуги в начале работы печи или при погасании дуги.

Плазменно-дуговые печи применяют, главным образом, для высоколегированных сталей и сплавов высокого качества, а также для переплава легированных отходов. При этом значительно уменьшается угар и экономятся легирующие элементы (хром, никель и др.), имеется возможность регулировать содержание азота в металле изменением состава атмосферы. ПДП применяются также для плавки высокопрочного чугуна.

Первая в мире промышленная плазменная сталеплавильная печь с керамическим тиглем вместимостью 5 т была разработана ВНИИЭТО, г. Москва совместно со специалистами ГДР на базе реконструкции дуговой сталеплавильной печи ДСВ-5. Одной из последующих разработок явилась 30-тонная ПДП с керамическим тиглем. У печи магнетитохромитовый отворотный свод, подина изготавливается из магнетитовой набивной массы, боковые магнетитохромитовые стены выполнены разъемными для удобства ремонта футеровки. Печь оборудована четырьмя плазмотронами постоянного тока, однако в ведении технологического процесса участвуют три плазмотрона, четвертый является запасным. Подводимое к печи напряжение 15 кВ; вторичное выпрямленное напряжение 150–600 В; удельный расход электроэнергии в период расплавления шихты (по проекту) 625 кВт·ч/т; расход аргона (по проекту) 60 м<sup>3</sup>/ч; расход охлаждающей воды (по проекту) 60 м<sup>3</sup>/ч.

Также получили распространение комбинации тигельных индукционных печей с плазмотронами их называют плазменно-индукционные печи. В них при совместной работе нагревателей традиционные технологические процессы интенсифицируются в 1,5–3 раза.

### 5.7.2. Плазменно-дуговые печи с водоохлаждаемым кристаллизатором

В отличие от выше описанных печей, плазменно-дуговые печи с водоохлаждаемым кристаллизатором [17] применяются для выплавки слитков практически из любых металлов и сплавов – сталей, титана, тугоплавких металлов, сплавов с легко испаряющимися добавками, а также для переплава отходов. ПДП данного типа используются для рафинировочного переплава твердых заготовок, выплавленных в обычных плавильных агрегатах, в результате которого свойства металла улучшаются благодаря дополнительной обработке активным газом и принудительной направленной кристаллизации в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

На схеме (рис. 5.22 а.) показана установка для плазменно-дугового переплава при горизонтальной подаче переплавляемой заготовки в рабочее пространство печи, а на рис. 5.22б приведена установка плазменно-дугового переплава при подаче переплавляемой заготовки сверху.

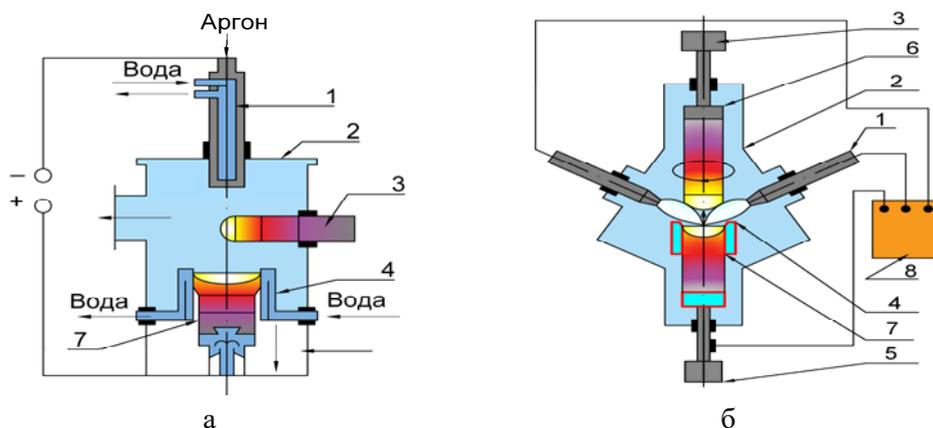


Рис. 5.22. Схемы переплавных ПДП с водоохлаждаемым кристаллизатором

В обоих случаях камеры установок состоят из двух частей. В первом случае это цилиндрические резервуары, во втором – верхний резервуар выполнен из двух усеченных конусов, сопряженных между собой большими основаниями, а нижний резервуар имеет цилиндрическую форму. На рисунке 5.22 а используется один плазмотрон 1, размещенный соосно с водоохлаждаемым кристаллизатором, по оси камеры. На рисунке 5.22б. изображены шесть плазмотронов 1, рас-

положенных радиально под углом к оси заготовки 3, причем последняя размещена соосно с водоохлаждаемым кристаллизатором 7. Верхние резервуары обеих установок называются плавильными камерами 2, они соединены болтами через изоляторы с нижними резервуарами. К патрубкам, размещенным в верхних камерах, подсоединены вакуумные системы, используемые при подготовке к технологическому процессу. Перед началом плавки печи герметизируют и дважды промывают аргоном, заполняя камеру аргоном до достижения атмосферного давления и откачивая вакуумным насосом.

Если при горизонтальной подаче заготовки плазмотрон обычно питается от источника постоянного тока, то в случае вертикальной подачи заготовки возможна работа как на переменном, так и на постоянном токе. Цепь между плазмотронами замыкается по ванне металла в кристаллизаторе, как в обычной дуговой печи. Для стабилизации температуры электродных пятен расплава в цепь плазмотрон-ванна от выпрямителя дополнительно подается постоянная составляющая тока. Плазменные дуги от каждого плазмотрона оплавляют нижний конец заготовки 3 и поддерживают в жидком состоянии верхнюю часть формирующегося слитка. Таким образом происходит переплавление заготовки и формирование слитка.

Для расширения технологических возможностей печей данного типа в них иногда используют промежуточную ванну (холодный под) аналогично электронно-лучевым печам.

На нижнем конусе (корпусе) имеется фланец для крепления плиты (поддона) кристаллизатора и камеры б с механизмом вытягивания и разгрузки слитка 7 (рис. 5.22б). В верхней камере печи имеется три патрубка со смотровыми системами для визуального наблюдения за процессом переплава, патрубков для крепления механизма подачи флюса.

Укороченный кристаллизатор 7 состоит из трех водоохлаждаемых поясов – двух медных и одного (нижнего) стального. Токоведущим штоком слиток 7 вытягивается из кристаллизатора 7. Подъем и опускание слитка осуществляется четырьмя гидроцилиндрами.

Переплавляемую заготовку 3 подвешивают к верхнему штоку (на рисунке не показан), соединенному с токопроводом. Водоохлаждаемый шток входит в камеру 2 через вакуумное уплотнение. Шток имеет возможность перемещаться вверх и вниз при помощи пары винт-гайка. Для более равномерного оплавления заготовки 3 при помощи специального механизма возможно осуществлять реверсивный поворот штока на угол  $60^\circ$ .

Для увеличения возможностей рафинирования металла в процессе переплава предусмотрена подача флюса на поверхность жидкой ванны формирующегося слитка 7. подача флюса осуществляется из специального бункера с дозатором.

Подача одной или нескольких заготовок сбоку дает возможность существенно уменьшить высоту ПДП, одновременно плавить заготовки различного химического состава и с различной скоростью, т.е. получать слитки сплавов из простых материалов.

Тепловой КПД плазмотрона, т.е. отношение мощности энерговыделения за срезом его сопла к общей электрической мощности, изменяется в широких пределах (45–85%) и зависит от конструктивных особенностей плазмотрона и рода плазмообразующего газа. При оптимальных режимах работы плазмотрона с использованием аргона относительные потери энергии в его сопле и на электроде (катоде) составляют не менее 25%, а по мере разбавления аргоновой плазмы азотом уменьшаются до 15%. Это означает, что при плазменно-дуговом нагреве металла может быть использовано около 75–85% подведенной электрической энергии.

Энергия, выделяемая за срезом сопла плазмотрона, расходуется полезно на плавление металла заготовки и поддержание расплава в кристаллизаторе. К бесполезным потерям тепла относятся нагрев верхнего пояса кристаллизатора, камеры печи и соседних плазмотронов.

Расплав в кристаллизаторе нагревается путем электронной и ионной (на переменном токе) бомбардировки, а также за счет радиационно-конвективного теплообмена с плазмой столба дуги. Расходуемая заготовка обычно не включается в электрическую цепь источника питания, и ее плавление осуществляется посредством только конвективной и лучистой теплопередач от плазменного факела. Поэтому вклад теплоты в металлическую ванну при оптимальном режиме ПДП примерно в 1,5 раза больше, чем в заготовку.

Увеличение коэффициента заполнения кристаллизатора и уменьшение расстояния между оплавающимся торцом заготовки и поверхностью металлической ванны приводят к возрастанию теплоотдачи от столба плазменной дуги в оба указанных объекта. Эффективность использования теплоты повышается также с увеличением мощности плазмотронов (за счет увеличения тока дуги и применения многоатомных газов). Так суммарный вклад энергии в металлическую ванну при работе на аргононе составляет 25–30% затраченной энергии, а в случае применения азота в качестве плазмообразующего газа может быть повышен до 60%. Количество теплоты, сообщаемой расходуемой заготовке и поступающей в кристаллизатор с каплями расплавленного металла, в общем тепловом балансе процесса ПДП сравнительно невелико и по аналогии с электронно-лучевыми печами не может превышать 30% общих энергетических затрат.

Водоохлаждаемый кристаллизатор – самый теплонапряженный узел плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым кристаллизатором. Кроме отвода теплоты с периферии металлической ванны и боковой поверхности слитка, верхний пояс кристаллизатора воспринимает значительную тепловую нагрузку за счет радиационно-конвективного теплообмена со столбами плазменных дуг. Вклад теплоты в кристаллизатор увеличивается с возрастанием мощности печи. Наибольшая плот-

ность теплового потока в верхней части кристаллизатора высотой до 90 мм, где он контактирует со слитком, составляет 1,5–2,8 МВт/м<sup>2</sup>, т.е. примерно в два раза больше, чем, например, при электрошлаковом переплаве. В зоне газового зазора, термическое сопротивление которого велико, плотность теплового потока в охлаждаемую стенку снижается в 3–10 раз.

При канонической схеме ПДП с водоохлаждаемым кристаллизатором, когда заготовка экранирует излучение столбов дуг, камера печи воспринимает 15–20% генерируемой плазмотронами теплоты. В случае ПДП с подачей некомпактной шихты тепловая нагрузка свода и стенок камеры, а также охлаждаемых корпусов плазмотронов увеличивается примерно на 10%.

Геометрию металлической ванны в ПДП принято характеризовать коэффициентами глубины и формы. Первый представляет собой отношение наибольшей глубины ванны к ее диаметру, а второй – отношение глубины ванны на половине радиуса слитка к ее глубине на оси.

Независимый источник теплоты, используемый в ПДП, позволяет регулированием производительности процесса и энергии, вкладываемой в металлическую ванну, изменять геометрию фронта затвердевания и, следовательно, направленность роста главных осей дендритов в структуре формируемого слитка.

При постоянной электрической мощности плазмотронов и использовании кристаллизатора заданного поперечного сечения производительность переплава определяется исключительно скоростью подачи расходуемой заготовки. Производительность обуславливает максимальную глубину металлической ванны, конфигурацию ее профиля и скорость кристаллизации металла по фронту затвердевания.

Независимый источник теплоты позволяет по окончании наплавления слитка осуществлять обогрев и подпитку его головной части при постепенном уменьшении мощности плазмотронов и тем самым легко получать слитки практически без усадочной раковины. Достаточная технологическая гибкость процесса позволяет получать слитки без поверхностных дефектов, для чего повышают удельные затраты теплоты на обогрев металлической ванны, выбирают оптимальную производительность переплава, применяют небольшие добавки синтетических шлаков.

По возможности рафинирования металла в процессе кристаллизации плазменно-дуговой переплав приближается к электро-лучевому, так как он позволяет регулировать скорость кристаллизации независимо от скорости плавления, поддерживать высокий градиент температуры в ванне кристаллизатора и плоскую форму ванны и создавать тем самым наиболее благоприятные условия для очистки металла при затвердевании. ПДП выгодно отличаются от электронно-лучевых печей простотой конструкции установки, более высокой производительностью, но уступают в возможности рафинирования металла от летучих примесей, в частности, от цветных металлов.

## 5.8. Установки плазменной резки и сварки металлов

Плазменная резка осуществляется путем выплавления и испарения металла в полости реза за счет энергии, выделяющейся в опорном пятне дуги и вносимой струей плазмы [18]. Режущая способность дуговой плазмы определяется соотношением

$$V\delta = 0,24 \frac{IU_{\eta}}{\gamma bS}, \quad (5.40)$$

где  $V$  – скорость резки;  $\delta$  – толщина металла;  $I$ ,  $U$  – ток и напряжение дуги;  $\eta$  – тепловой КПД;  $\gamma$  – плотность;  $b$  – ширина реза;  $S$  – энтальпия расплавленного металла.

Энергетический баланс резки складывается из энергии дуги, химических реакций плазмы с металлом (если они возможны) и расхода энергии на расплавление, перегрев, испарение металла в полости реза, теплопередачу в твердый металл и унос с отработавшим потоком плазмы.

Отсюда следует, что процесс плазменной резки необходимо вести с максимальной мощностью и максимальной скоростью, обеспечиваемой вспомогательными операциями и применением ЭВМ. Это условие выполняется при выборе тока, напряжения, плазмообразующего газа и конструкции режущего плазмотрона.

Ширина реза, определяющая экономичность процесса, связана с диаметром сопла плазмотрона, током дуги и скоростью перемещения плазмотрона.

Чрезмерное увеличение мощности и снижение скорости движения плазмотрона приводит к увеличению ширины реза, особенно в нижней его части, и перегреву всего разрезаемого металла. Коэффициент полезного действия плазменной резки возрастает с повышением мощности дуги и скорости движения плазмотрона, достигая 80–90%, тепловой КПД принимают равным 40%.

Режущий плазмотрон (рис. 5.23) с газовой стабилизацией дуги имеет стержневой вольфрамовый (или циркониевый) электрод 3, соосно расположенный в полости сопла 2. Стабилизирующий газ подается между ними и обеспечивает проникновение плазмы в глубину металла. При включении установки существует такая последовательность операций: включается подача воды, охлаждающей сопло и электрод, устанавливается необходимый расход газа; поджигается дежурная дуга, ток которой ограничивается сопротивлением 6, и возникает факел плазмы. При касании дежурным факелом кромки металла возникает цепь силовой плазменной дуги и начинается интенсивный процесс резки. При случайных погасаниях режущей дуги дежурная дуга восстанавливает процесс. При резке металла малых толщин применяется плазменная струя без включения металла в цепь тока (рис. 5.23б).

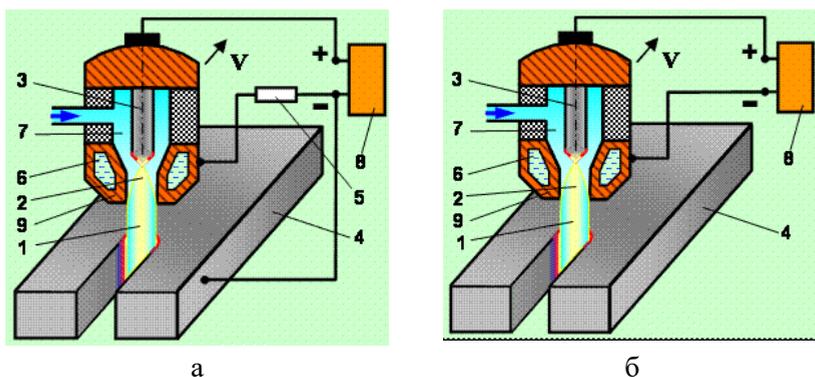


Рис. 5.23. Схемы резки металла плазменной дугой (а) и плазменной струей (б)

Промышленные установки разных типов работают на токах до 1000 А при напряжении холостого хода до 350 В, обеспечивая скорость резки от 3 до 10 м/мин.

Плазматроны, выполняемые по схеме рис. 5.23а, являющейся основной при плазменной резке, рассчитывают на рабочий ток, а напряжение дуги формируется в полости реза. Вследствие этого вольтамперные характеристики дуги здесь падающие, а источники питания имеют вертикальные или крутопадающие внешние характеристики.

Высокая мощность плазматрона и динамическое воздействие плазмы позволяют сваривать металлы разных толщин без подачи присадочной проволоки в сварочный шов, заваривать отогнутые кромки состыкованных деталей, сваривать детали без разделки кромок, осуществлять сварку металла большой толщины за один проход.

В зависимости от рода свариваемого металла применяют аргон, смеси аргона с гелием или водородом.

В состав установки входит источник питания, представляющий собой трехфазный шестипульсный выпрямитель с регулируемым значением сварочного тока и крутопадающей ВАХ; высокочастотный генератор-осциллятор, служащий для возбуждения дежурной дуги между внутренним соплом и электродом в потоке аргона. Ток дежурной дуги ограничивается сопротивлением  $R$ , а емкость  $C$  служит для облегчения пробоя напряжением высокой частоты межэлектродного промежутка. Для начала процесса сварки необходимо коснуться свариваемого изделия светящейся частью струи плазмы. Тогда по цепи потечет сварочный ток, разогревающий металл в точке воздействия плазмы и образующий сварочную ванну.

Источники питания обеспечивают сварочный ток до 450–600 А при напряжении дуги 60–80 В и скорость сварки, например, алюминиевого сплава толщиной 4 мм при токе 250 А и расходе плазмообразующего газа 5 л/мин, равную 70 м/ч.

## 5.9. Установки утилизации твердых отходов

Во всем мире проблема утилизации и переработки отходов остается актуальной. Решение данной проблемы в нашей стране связано с применением как стационарных специализированных предприятий в каждом регионе, так и создание мобильных чаще всего плазменных установок для утилизации и обезвреживания не только муниципальных, но также радиоактивных и высокотоксичных отходов, которые невозможно переработать традиционными методами.

Нужно иметь в виду, что промышленная переработка отходов не имеет «готовых решений», вследствие чего отработка технологических решений, выбор основного и вспомогательного оборудования определяются отдельно для каждого конкретного случая. Промышленная эксплуатация таких мобильных комплексов имеет ряд преимуществ по сравнению со стационарными установками, поскольку сводится к нулю риск заражения окружающей среды во время транспортировки опасных отходов в результате дорожно-транспортного происшествия или нарушения целостности защитных контейнеров, снижаются требования к задачам логистики и пр. Кроме того, мобильные плазменные комплексы могут найти применение для решения некоторых задач МЧС. Так, например, на рис. 5.24. показана принципиальная технологическая схема установки, предложенной по заказу МЧС фирмой *E.S.T. Ecological System Ltd* для плазмотермической детоксикации проливов огнеопасных веществ, токсичных и экологически опасных материалов производительностью 30 кг/ч по твердым отходам и 50 кг/ч – по жидким отходам[19].



Рис. 5.24. Принципиальная схема мобильной опытно-промышленной плазменной установки

Основу оборудования составляет двухкамерная кессонная металлургическая печь с ванной расплава шлака и металла и плазмотроном на боковой стенке, обеспечивающим температурный уровень от 2000 до 5000°С. Максимальная проектная пропускная способность по отходам 60 кг/ч (500 т в год). Монтаж установки выполнен в 20-футовом транспортируемом автомобильном контейнере. С целью достижения максимальной эффективности переработки отходов, система управления позволяет регулировать рабочие параметры установки, такие как расход перерабатываемого сырья, степень перемешивания материала с плазменным потоком, время нахождения компонентов отходов в плазменном реакторе, достаточное для деструкции токсичных веществ. На рисунке 5.25 показана фотография её модуля.



**Рис. 5.25. Внешний вид плазменного модуля мобильной опытно-промышленной установки**

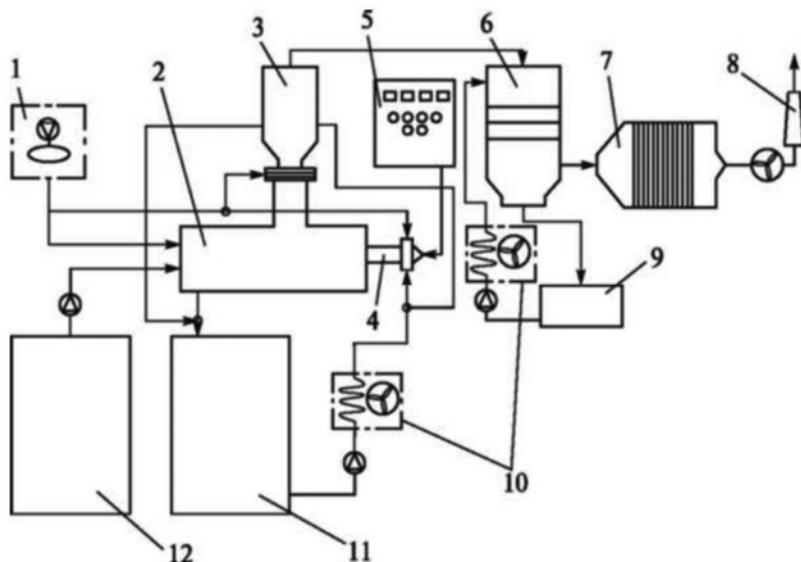
В России также созданы технологические установки аналогичного назначения. В состав их входят: устройство для подачи химических отходов, плазменный реактор с электродуговым плазмотроном постоянного тока типа ПДС-3, система закалки, основная абсорбционная система, экологическая абсорбционная система.

Процесс переработки отходов является непрерывным. При подведенной электрической мощности 50 кВт, количество подаваемого по схеме противотока сырья регулируется от 20 до 40 л/час. Исходное сырье – отходы химических производств – может быть газообразным, жидким или в виде суспензии. Плазмообразующий газ – воздух. Среднемассовая температура на выходе из сопла плазмотрона 4000–5000 К, температура в плазменном реакторе 1500–1700°С, закалка в системе охлаждения обеспечивает снижение температуры до 300–400°С. В основной абсорбционной системе происходит абсорбция галогенов (хлора и бро-

ма), содержащихся в отходах, с последующим охлаждением смеси отходящих газов до температуры 80°C. Экологическая адсорбционная система предназначена для финишной очистки и охлаждения отходящих газов до температуры 50°C.

На предприятиях химической промышленности эти установки используются для реализации процессов переработки хлористого метилена ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ), метилхлорида ( $\text{CH}_3\text{Cl}$ ). Анализ газовой фазы на выходе из системы газоочистки установки, выполненный независимой компанией, показал практически полное отсутствие токсичных соединений.

Другая отечественная разработка показана на рис. 5.26, где: 1 – воздушный компрессор; 2 – плазменный реактор; 3 – закалочный модуль; 4 – плазмотрон; 5 – источник электропитания; 6 – центробежно-барботажный аппарат; 7 – ионно-обменный фильтр; 8 – вытяжной вентилятор и выхлопная труба; 9 – емкость для сбора и охлаждения поглощаемого раствора; 10 – калорифер с принудительным охлаждением; 11 – емкость жесткой охлаждающей воды с системой теплообменников; 12 – емкость с жидкими отходами. В основу разработки положены требования, обеспечивающие необходимые технические характеристики установки: среднемассовая температура плазменной струи на выходе из сопла плазмотрона 4000–5000°C; температура в зоне сжигания (или пиролиза) отходов в интервале 1500–1700°C (зависит от состава отходов); время удержания продуктов пиролиза в реакторной зоне более 2 с, степень разложения токсичных отходов на установке 99,98%.



**Рис. 5.26. Принципиальная схема плазменной мобильной установки для уничтожения отходов**

Установка оснащена устройствами и приборами, позволяющими регулировать мощность плазмотрона, расход плазмообразующего газа, количество подаваемых отходов, расход воздуха на закалку, количество продуктов реакции в закалочной камере, а также работу системы газоочистки (расход воздуха и поглощающего раствора в вихревом скруббере, орошающего раствора в ионно-обменном фильтре). Давление воздуха, требуемого для работы установки, обеспечивается автономным воздушным компрессором с фильтром тонкой очистки (от паров масла) и блоком подготовки (осушки) воздуха. Для сглаживания пульсаций давления воздуха используется ресивер. Разряжение, создаваемое дымососом, регулируется специальным шибером. В случае необходимости дополнительное количество воздуха для дожигания и охлаждения потока отходящих газов может подаваться от внешней цеховой системы или от специальной воздушодувки. Отходы подаются и диспергируются пневматической форсункой.

Для нагрева перерабатываемых отходов используется электродуговой плазмотрон линейного типа, номинальной мощностью 50 кВт. Оптимальный расход плазмообразующего газа – воздуха 15 м<sup>3</sup>/час, расход технической воды на охлаждение плазмотрона – 150–200 г/с, коэффициент полезного действия 70%, температура плазменной струи на выходе из сопла плазмотрона 4300–5000 К. Основной особенностью плазмотрона является ступенчатый выходной электрод, состоящий из двух цилиндров различных диаметров  $d_2$  и  $d_3$ , причем  $d_3 > d_2$  и отношение  $d_3/d_2 = 2$ , что обеспечивает фиксацию длины электрической дуги. Внезапное расширение канала создает такие аэродинамические условия за уступом, при которых преимущественное шунтирование дуги происходит непосредственно за зоной срыва потока. Этим обеспечивается постоянство средней длины дуги, в достаточно широком диапазоне изменения определяющих параметров, таких как ток дуги, расход газа и его давление (при фиксированных значениях  $L_2$  и  $d_2$ ). Вольтамперная характеристика плазмотрона при работе от источника электропитания УПР-4010 в рабочем диапазоне параметров – возрастающая. При этом реализуется устойчивое горение дуги без балластного сопротивления в электрической цепи при электрическом КПД, близком к единице.

Плазменный реактор используется противоточного типа, в котором плазменная струя и жидкие или газообразные отходы, диспергируемые форсункой, подаются навстречу друг другу.

Дожигание и охлаждение отходящих газов выполняется в закалочном трехсекционном модуле путем подачи дополнительного воздуха. Температура отходящих газов на входе в систему газоочистки, в зависимости от режимов работы установки, изменялась в диапазоне от 150 до 520°С.

Очистка отходящих газов реализуется сочетанием двух аппаратов, центробежно-барботажного аппарата ЦБА (вихревого скруббера) и ионно-обменного фильтра. Анализ выбрасываемых в атмосферу отходящих газов выполнен газоанализатором «Эксперт Универсал».

Поддержание параметров технологического процесса производится в ручном режиме за счет применения исполнительных механизмов. Необходимые значения параметров установки (расходов, температур, разрядения, и др.) поддерживаются системой управления, состоящей из пульта управления источником питания плазмотрона, датчиков температуры, расхода газа, воздуха и воды. Эти же элементы, а также дополнительные исполнительные механизмы, обеспечивают безопасность функционирования установки.

### Контрольные вопросы

1. Какие виды разрядов вы знаете?
2. Что такое «плазма» и каковы способы её получения?
3. Как называются аппараты, предназначенные для создания плазмы?
4. Какие плазмтроны вы знаете? Чем они различаются?
5. Как можно классифицировать плазмтроны?
6. В чем особенности плазменно-дуговых печей?
7. Чем отличаются плазменно-дуговые печи различных конструкций?
8. Как осуществляется запуск плазмтрона?
9. Как выполнена схема электропитания плазмтронов постоянного и переменного тока?
10. В чем особенности струйных плазмтронов?
11. Для чего используются струйные плазмтроны?
12. Какие особенности у резки и сварки плазменной дугой?
13. В чем особенности плазменной утилизации отходов?
14. Какие особенности имеет технология плазменно-дуговой плавки?
15. Какие процессы происходят внутри плазмтрона при работе плазмтрона?

### Список рекомендуемой литературы к главе 5

1. Райзер, Ю.П. Физика газовой разряда: учеб. руководство – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1992.
2. Кудинов, И.Д., Николаев А.В. Способ создания высокотемпературного газового потока: авт. свид. № 125323. Бюллетень изобретений № 1 за 1960.
3. Кудинов, И.Д., Николаев, А.В. Горелка для термической обработки различных материалов. Авт. свид. № 121885. Бюллетень изобретений №16 за 1959.
4. Рыкалин, Н.Н. Металлургические ВЧ-плазмтрон: Электро- и газодинамика / Н.Н. Рыкалин, Л.М. Сорокин. – М.: Наука 1987.
5. Дресвин, С.В. Генераторы низкотемпературной плазмы / С.В. Дресвин // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 2 / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2000.

6. Жуков, М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975.
7. Чередниченко, В.С. Плазменные электротехнологические установки: учеб. пособие / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин / под ред. В.С.Чередниченко. – Новосибирск, 2005.
8. Коротеев, А.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет / А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук. – М.: Машиностроение, 1993.
9. Кручинин, А.М. Расчет энергофизических параметров плазменной печи с использованием цилиндрической модели дуги Меккера / А.М. Кручинин, М.Я. Погребиский, Е.С. Рязанова и др. // ФХОМ. – 2022. – №2. – С.13–22.
10. Maecker, H. Plasmaströmungen in Lichtbogen infolge eigen-magnetischer Kompression / H. Maecker. Zeitschrift für Physik. – 1955. – No. –141. – P. 198–216.
11. Исакаев, Э.Х. Исследование генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода / Э.Х. Исакаев, О.А. Синкевич, Н.О. Спектор и др. // ТВТ. – 2010. – Т 48. – Вып. 6. – С. 816–827.
12. Жуков, М.Ф. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками / М.Ф. Жуков, А.С. Аньшаков, И.М. Засыпкин и др. – Новосибирск: Наука, 1981.
13. Бортничук, Н.И. Плазмодуговые плавильные печи / Н.И. Бортничук, М.М. Крутянский. – М.: Изд-во Энергоиздат, 1981.
14. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing / Katashi Osaki, Osamu Fukumasa, Akira Kobayashi. Pergamon, Vacuum 59. – 2000. – P. 47–54.
15. Boulos, M.I. Thermal Plasmas / M.I.Boulos. P. Fauchais, E. Pfender // Fundamentals and Applications. – Vol.1. – Plenum Press – New York and London, 1994.
16. Krouchinin, A.M. A theory of electrical arc heating / A.M. Krouchinin, A. Sawicki // The Publishing Office of Technical University of Częstochowa, Częstochowa, 2003.
17. Чернышов, Е.А. Специальные плавильные печи. Ч. 1. Электродуговые печи: учеб. пособие / Е.А. Чернышов. – Нижний Новгород, 2014.
18. Лащенко, Г.И. Плазменная резка металлов и сплавов / Г.И. Лащенко. – Киев: Экотехнология, 2003.
19. Моссэ, А.Л. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов / А.Л. Моссэ, В.В. Савчин. – Минск: Беларуская навука, 2015.

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

### 6.1. Физические основы электронно-лучевой технологии, классификация и области применения электронно-лучевых технологических установок (ЭЛУ)

Электронно-лучевые технологии (плавка и рафинирование металлов, размерная обработка, сварка, термообработка, нанесение покрытий испарением, декоративная обработка поверхности и многие другие) созданы на основе достижений физики, электроники, электронной оптики и вакуумной техники.

После открытия электрона и измерения отношения его заряда к массе началось широкое изучение свойств электронных потоков, их получения и взаимодействия с электрическими и магнитными полями. Так например, электронный микроскоп был создан в 20–30-х годах трудами ряда ученых, в том числе Н. Руска, М. фон Арденна (Германия), В.К. Зворыкина (США). В нем применялись электронные пушки небольшой мощности с малыми токами и большими разгоняющими напряжениями. Тогда же были разработаны электростатические и магнитные системы управления электронным пучком.

Идея создания установки электронно-лучевого нагрева появилась еще в начале XX в., как результат, в 1905 г. М. фон Пирани получил патент Германии на использование электронного луча как источника нагрева. Однако для технологического использования требовались более мощные электронные пучки, создание которых связано с различными конструктивными трудностями, а также были необходимы исследования взаимодействия электронного луча и материалов, которые он обрабатывал.

Первые электронно-лучевые установки (ЭЛУ) для плавки ниобия и тантала были созданы в 50-х годах. С 1960 г. ЭЛУ стали использоваться для нанесения покрытий, а затем и для обработки поверхности и размерной обработки, с 1970 г. – для нетермической микро-обработки и химической обработки полимеров.

Принципы создания электронной пушки для плавки и сварки были разработаны в 1940 г. (Дж.Р. Пирц, США) им же была разработаны методики расчетов диодных и триодных электронно-лучевых пушек.

В СССР в конце 50-х годов работы по ЭЛУ начали вести несколько организаций: кафедры физики (Н.А.Ольшанский) и ЭТУ (М.Я. Смелянский, Л.Г. Ткачев) МЭИ, ВЭИ (В.И. Переводчиков), ВНИИЭТО (В.А. Хотин), ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР (Б.А. Мовчан), ВИЛС (А.Ф. Белов, И.А. Кононов) и др.

В МЭИ на кафедре ЭТУ в 1959 г. был создан стенд с пушкой мощностью до 60 кВт. В 1961 г. во ВНИИЭТО спроектирована и изготовлена электронно-лучевая печь-стенд мощностью 200 кВт. Плоско-лучевые пушки мощностью

20–300 кВт при ускоряющем напряжении 15–20 кВ созданы в ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, серию промышленных электронных пушек на мощности 60–500 кВт разработал ВЭИ.

В 1957–1958 гг. под руководством Н.А.Ольшанского (МЭИ) и Б.А. Мовчана (Институт электросварки им. Е. О. Патона) независимо от работ иностранных ученых были проведены исследования по применению электронно-лучевой сварки и был открыт эффект глубокого «кинжального» проплавления. Это открытие и определило основное направление развития технологии на последующие десятилетия.

За рубежом подобные пушки применяли фирмы «Герейус» (ФРГ) и «Штауффер темескал» (США). Мощные аксиальные электронные пушки (до 1200 кВт при напряжении 35 кВ) были созданы для плавки М. фон Арденне в ГДР. Первый агрегат непрерывного элиминирования стали с использованием ЭЛУ вместо электролитического лужения был построен в США в 1965 г.

Для испарения материала (алюминий, цирконий, сталь, различные сплавы и др.) созданы специальные электронно-лучевые испарители. Промышленный испаритель подобного типа был установлен в ГДР в 1971 г. на основе разработок М. фон Арденне. (На стальную ленту шириной 400 мм наносилось двустороннее покрытие алюминием толщиной 2 мкм на сторону при скорости движения ленты до 3 м/с.)

Агрегаты такого типа разрабатывала также фирма «Лейбольд – Хереус» (ФРГ): общая мощность нескольких электронно-лучевых пушек-испарителей 1500 кВт, ширина ленты 1000 мм, скорость ее движения до 5 м/с. Фирма «ЮС Стил» (США) изготавливала установки для ленты шириной до 1250 мм при скорости до 7,5 м/с.

В СССР практически одновременно использовались аналогичные агрегаты, разработанные ВНИИ металлургического машиностроения (ВНИИметмаш), СКБ вакуумных покрытий при Госплане Латвийской ССР, ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР. В них были использованы пушки аксиального и плоско-лучевого типа с поворотом луча магнитной системой на 90–270°.

В 1979 г. советскими космонавтами в космических условиях успешно испытана экспериментальная аппаратура «Испаритель» с применением электронно-лучевого нагрева. В перспективе возможно создание металлических покрытий (защитных, отражающих и др.) на конструкциях непосредственно в космическом пространстве, т.е. с использованием космического вакуума.

Разработки и исследования различных агрегатов и технологий с использованием электронного луча продолжаются и в наши дни, так, например, можно отметить целый ряд работ по различным аддитивным технологиям [1 – 5].

Электронная пушка, входящая в состав энергетического блока, является основным элементом электронно-лучевой установки, непосредственно отвечающим за формирование электронного пучка. В состав электронной пушки входят

генераторы электронного пучка, различной конструкции, системы фокусировки и проведения его к обрабатываемому изделию. Электронная пушка может быть неподвижной, закрепленной на вакуумной камере, или подвижной, перемещаемой относительно неподвижного изделия (например, при сварке крупногабаритных изделий сложной формы). В последнем случае особые требования предъявляются к силовому высоковольтному кабелю, соединяющему электронную пушку с источником электропитания.

Генератор электронного пучка – это система электродов электронной пушки, служащая для формирования пучка электронов. Наибольшее распространение получил трехэлектродные генераторы, где помимо катода и анода имеется управляющий электрод, позволяющий, подобно сетке в электронной лампе, управлять силой тока пучка.

Система проведения служит для обеспечения заданного размера пятна нагрева, плотности мощности (тока) в этом пятне, а иногда и для распределения плотности мощности по радиусу зоны нагрева, предотвращая потери мощности пучка. Кроме того, зона обработки может располагаться и не по оси пучка, она может располагаться в различных точках плоскости, и даже различных плоскостях, перемещаться во времени и пространстве. Система проведения, таким образом, выполняет две обязательные функции – это фокусировка и отклонение, которые могут быть как статическими, так и динамическими системами.

Сущность процесса электронно-лучевой обработки состоит в том, что кинетическая энергия сформированного в вакууме потока электронов преобразуется в тепловую энергию в зоне взаимодействия с обрабатываемым материалом.

При электронно-лучевой обработке используется кинетическая энергия электронов, разгоняемых в электрическом поле до высоких скоростей, и преобразуемая в тепловую энергию при торможении электронов о поверхность твердого тела или жидкого металла. При этом часть электронов отражается, остальная часть поглощается данным металлом, а кинетическая энергия последних преобразуется в тепловую энергию, при этом возникает рентгеновское излучение.

Поток электронов создается специальным устройством – *электронной пушкой*, в которой происходит испускание, ускорение и фокусирование электронов в плотный пучок, называемый *электронным лучом*. Причем, данный поток электронов ускоряется в поле высокого напряжения (20–40 кВ), приложенного между катодом и анодом. Необходимая для нагрева металла плотность потока электронов достигается с помощью фокусирующей электромагнитной системы пушки [3 – 5].

Электронный нагрев является ярко выраженным поверхностным нагревом, а передача тепла к основной массе металла осуществляется теплопроводностью или конвекцией.

При столкновении электронов с поверхностью не вся их энергия передается металлу, т.е. преобразуется в теплоту (рис. 6.1). Часть электронов отражается, унося с собой часть энергии, потери мощности электронного луча в результате отражения электронов могут достигать 20% мощности бомбардирующего электронного пучка. Но наиболее заметные потери мощности могут происходить на пути электронного пучка от катода до поверхности металла. Эти потери складываются из потерь энергии отдельных электронов при столкновении их с частицами газа и потерь, возникающих в результате взаимодействия электронного пучка в целом с ионизированным остаточным газом [5].

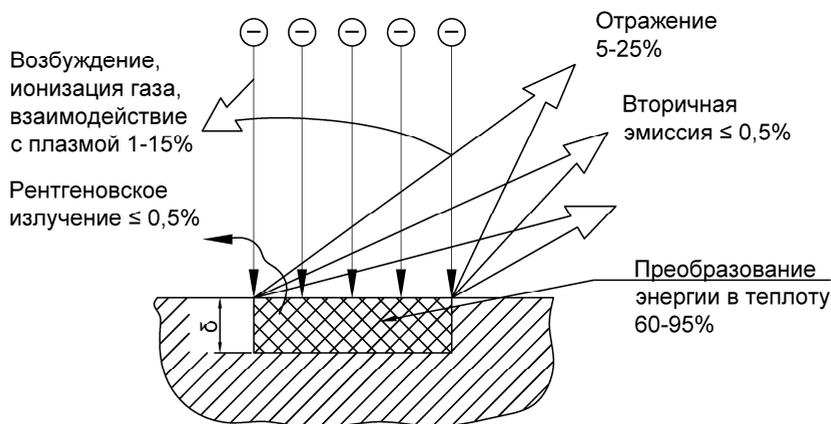


Рис. 6.1. Схема явлений, происходящих при электронно-лучевом нагреве металла

Столкновение ускоренных электронов с частицами остаточного газа или парами металла, как известно, сопровождаются перераспределением энергии и возбуждением или ионизацией нейтральных частиц. При этом вокруг луча образуется слой заряженных частиц. В результате взаимодействия электронного луча с полем ионизированного газа первоначально однородный по длине луч становится неустойчивым. Получать плотный, не рассеивающийся в пространстве поток электронов, можно только в вакууме при остаточном давлении менее 0,05 Па, при котором потери мощности луча резко падают и составляют 1–2% [3]. В целом, потери энергии луча на пути к поверхности металла зависит от длины пути, силы тока пучка, скорости электронов и концентрации частиц в газовой фазе (давлении). Три первых параметра определяются конструкцией установки и не могут быть изменены произвольно. Поэтому величина потерь по длине луча определяется концентрацией частиц в газовой фазе или давлением (глубиной вакуума).

При низком давлении остаточных газов частицы в газовой фазе бывают представлены в основном парами металла, которые и являются главной составляющей потерь мощности энергии электронов. Концентрация паров определяет

ся перегревом металла над температурой плавления. Увеличение перегрева повышает упругость паров, усиливает испарение, и даже при низких давлениях остаточных газов значительно увеличивает энергетические потери луча. Конструктивное решение электронно-лучевых установок определяется технологическим процессом, реализуемым на данной конкретной установке и конструктивным решением того специализированного устройства, с помощью которого формируется электронный луч.

Выделение тепловой энергии происходит на глубине, величина которой определяется выражением:

$$\delta = 2,1 \cdot 10^{-17} \left( \frac{U^2}{\rho} \right), \quad (6.1)$$

где  $\delta$  – глубина проникновения электрона в металл, м;  $U$  – ускоряющее напряжение, кВ;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>. Данная формула, известна как формула Шонланда. Из неё следует, что мощность пучка электронов поглощается очень тонким поверхностным слоем изделия (металла). Так, при ускоряющем напряжении 40 кВ глубина проникновения электронов в сталь составляет примерно  $\delta = 5$  мкм. Это указывает на то, что электронный нагрев является ярко выраженным поверхностным нагревом.

Существуют зависимости, позволяющие приближенно оценивать размеры области взаимодействия электронного пучка с материалами. Например, Канаи и Окаяма предложили определять средний траекторный пробег электронов как радиус полуокружности  $R$  с центром в точке падения луча:

$$R = \frac{0,0276 A \cdot E_0^{1,67}}{Z^{0,889} \cdot \rho}, \quad (6.2)$$

где  $A$  – атомная масса материала изделия, г/моль,  $E_0$  – энергия электронов пучка, кЭв,  $Z$  – атомный номер материала изделия,  $\rho$  – плотность материала мишени, г/см<sup>3</sup>. При подстановке значений в указанных единицах, величина траекторного пробега получается в мкм. Например, для железа при энергии пучка 60 кЭв, траекторный пробег, вычисленный по выражению (6.2) составляет 10 мкм, для титана 17,4 мкм, для алюминия – 26,4 мкм.

Траекторный пробег  $R$  является критерием, по которому определяют, можно ли для данной задачи считать источник нагрева чисто поверхностным (распределенным вдоль осей  $x$  и  $y$ ), или же распределением по оси  $z$  пренебрегать нельзя. Если диаметр более чем на порядок превосходит величину пробега, то источник можно схематизировать как поверхностный. В этом случае, при диаметре пучка более 0,1 мм для большинства металлов объемным характером тепловыделения в изделии можно пренебречь.

При обработке с плавлением материала, в зависимости от плотности мощности, выделяемой в изделии, процессы можно условно разделить на 4 группы (см. рис. 6.2) Цифрами на данном рисунке изображены: 1 – первичные электроны;

2 – жидкая ванна; 3-отраженне электроны; 4 – вторичные электроны; 5 – тормозное излучение; 6 – оптическое излучение; 7 – пар, плазма. В так называемом «мягком» режиме, при малом токе, или расфокусированном пучке (рис. 6.2а), жидкая ванна в поперечном сечении имеет форму, близкую к дуге окружности. Интенсивного испарения не происходит, и поэтому поверхность расплава практически не деформируется. Такой режим обычно используется при переплавке и сварке-герметизации тонкостенных корпусов, когда требуется исключить попадание паров внутрь корпуса и образование полостей. При взаимодействии пучка электронов с металлом, как в жидкой, так и в твердой фазе, происходит упругое и неупругое отражение электронов, генерация вторичных электронов и тормозного излучения, имеющего спектр рентгеновского излучения. Нагретый металл, как в твердой, так и в жидкой фазе, является источником оптического излучения (ИК волны и видимый спектр).

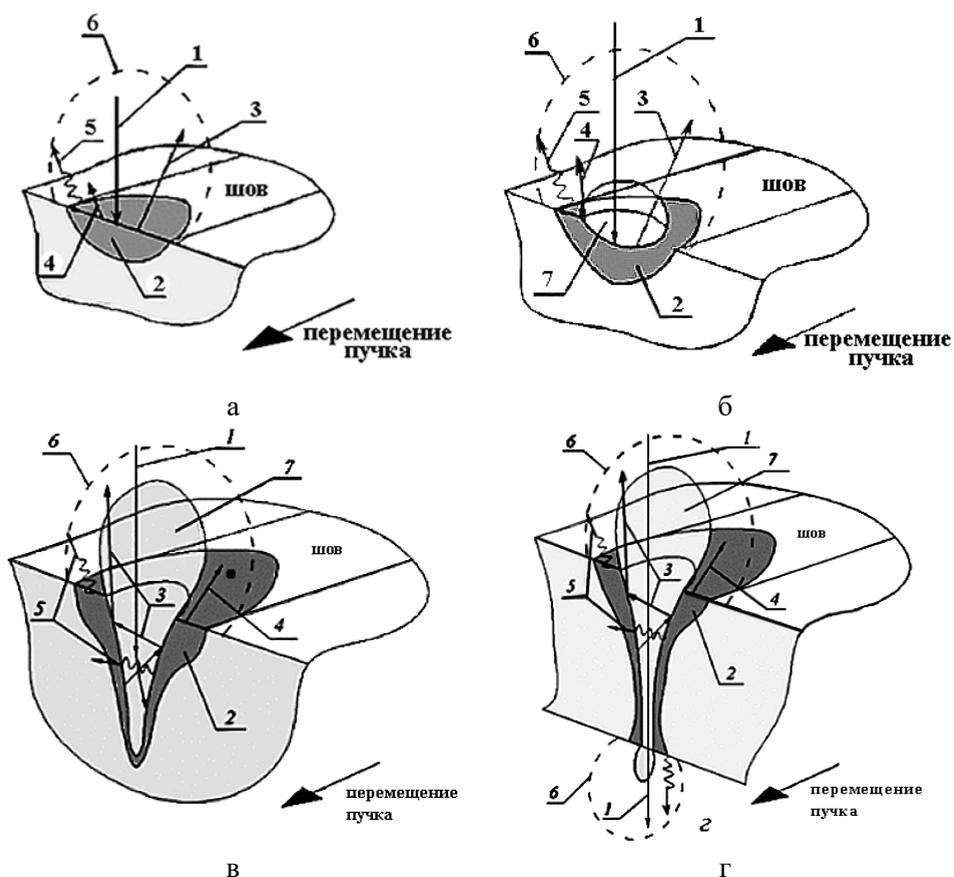


Рис. 6.2. Схемы процессов взаимодействия электронного пучка с материалом

При дальнейшем повышении плотности мощности интенсифицируется процесс испарения. Например, для алюминия при плотности потока энергии  $q = 2 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> и площади пятна нагрева  $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup> через время  $\tau_n = 1 \cdot 10^{-4}$  с средняя концентрация частиц пара в объеме канала составляет  $n = 1,9 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> [5]. Под действием давления отдачи паров поверхность жидкой фазы деформируется (на рис. 6.2 б – малая деформация поверхности жидкой ванны).

При непрерывном перемещении пучка относительно изделия во время сварки данный процесс приводит к незначительному вытеснению металла и образованию так называемого усиления шва. Электронный пучок взаимодействует с парами металла, что сопровождается потерями энергии на нагрев пара и ионизацию частиц. Процесс ионизации газов электронным пучком, или образование пучковой плазмы является малоизученным. Регистрируемые характеристики плазмы указывают на вероятность существования несамостоятельного разряда у поверхности изделия, что может оказывать существенное влияние на эмиссию частиц при сварке, резке и перфорации с высоким отношением глубины шва к ширине.

Режим обработки, получивший название «кинжального», обычно достигается при плотности мощности, превышающей  $10^5$ – $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> (на рис 6.2 в – формирование глубокого парогазового канала). Плотность паров по глубине канала возрастает, и приближается к плотности жидкой фазы у дна. Возможна ситуация, при которой практически вся мощность электронного пучка будет поглощаться в парогазовом канале, что будет ограничивать глубину проплавления. При глубоком проплавлении резко снижаются коэффициенты отражения электронов и вторичной электронной эмиссии, что обусловлено поглощением вторичных и отраженных электронов стенками канала, и повышается термический КПД обработки. Кроме того, при достижении глубокого проплавления снижается регистрируемое тормозное излучение. При обработке с «острой» фокусировкой отчетливо заметен плазменный «факел» над изделием, который является источником ультрафиолетового излучения. На рисунке 6.2г показана схема в режиме сквозного проплавления с образованием парогазового канала. Этот режим используется в тех случаях, когда необходимо формирование узкого сварного шва на всю глубину изделия.

Приведенные примеры показывают, что путем регулирования энергетических и геометрических характеристик электронного пучка, можно изменять форму и размеры зоны проплавления, а также воздействовать на интенсивность процессов преобразования энергии в парогазовом канале. Потери энергии на плавление, испарение, отражение электронов, ионизацию и нагрев газа, будут фактически определять термический КПД процесса.

Основные технологические процессы, реализуемые в современном производстве с применением электронно-лучевого нагрева, приведены на схеме рис. 6.3. В блоках схемы указаны диапазоны мощностей электронных пучков, применяемых для данных технологий.



Рис. 6.3. Основные виды электронно-лучевых технологических процессов

**Электронно-лучевая плавка и рафинирование.** Наиболее энергоемкие процессы, в которых используются электронные пучки – это процессы плавки материалов. В основном, процесс электронно-лучевого переплава применяется для вакуумного рафинирования химически активных и тугоплавких материалов. Открытая ванна и высокий перегрев металла в электронно-лучевых печах создают необходимые условия для удаления примесей из переплавляемого металла, особенно если примесь имеет более высокую упругость пара, чем основной металл. Мощные электронно-лучевые печи в основном применяются в металлургической промышленности, а установки средней и малой мощности находят применение для очистки полупроводниковых материалов, и специальных сплавов для атомной промышленности.

**Электронно-лучевая сварка.** Процессы электронно-лучевой сварки проводятся в широком диапазоне мощностей электронных пучков, а сами пучки могут иметь различную форму и перемещаться по сложным траекториям. Это объясняется тем, что толщина свариваемых за один проход луча изделий может составлять от 0,05 до 400 мм, изделия могут быть изготовлены из разнородных, тугоплавких и химически активных материалов. В этой области технологии в наибольшей степени реализуется такое преимущество электронно-лучевой технологии, как возможность получения каналов проплавления с высоким отношением глубины шва к ширине (до 40), и минимальные деформации свариваемых изделий за счет узкой локализации теплового источника.

**Нанесение покрытий.** Технология осаждения покрытий из газовой фазы методом электронно-лучевого испарения применяется для нанесения защитно-декоративных покрытий на металлические изделия, контактных слоев в микроэлектронике, интерференционных и просветляющих покрытиях в оптике. Эти установки мощностью от 2 до 30 кВт являются наиболее распространенными из выпущенных на сегодняшний день мировой промышленностью образцов электронно-лучевого технологического оборудования.

**Размерная микро обработка.** В электронно-лучевых установках малой мощности (до 1 кВт) применяются электронно-оптические схемы, аналогичные используемым в электронных микроскопах. В таких установках ускоряющие напряжения могут составлять до 150 кВ, а для юстировки пучка применяются механические и магнитные юстировочные системы. При малых токах пучка удается локализовать полную мощность электронного пучка в пятне диаметром не более 20 мкм. При перемещении пучка и достаточной мощности источника питания материал изделия испаряется, и образуется так называемый «рез». Электронные пучки малого сечения эффективно используются для резки тонколистовых материалов и фольг, изготовления тонкопленочных резистивных и индуктивных элементов, резки подложек с нанесенными функциональными слоями, символической маркировки изделий и гравировке.

**Перфорация.** Последнее время актуально получение отверстий в тонколистовых материалах с помощью электронных пучков. Актуальность применения данной технологии обусловлена, прежде всего, высокой производительностью процесса (десятки тысяч отверстий в секунду), возможностью получения отверстий диаметром не более 0,1 мм, даже в тугоплавких и химически активных материалах. Основное применение технологии в промышленности – изготовление технологических фильтров. Для этих целей, как правило, используются сварочные электронно-лучевые установки с программным управлением.

**Локальная термообработка.** В ряде случаев требуется локальная термическая обработка (например, закалка) отдельных поверхностей изделия. Возможность пространственной развертки электронного пучка в сканирующий растр с частотами до 1 кГц при возможности слежения за его положением с применением тепловизионной техники или сигналов отраженных электронов, делают данную технологию термообработки уникальной. По КПД и производительности электронно-лучевая термообработка превосходит лазерную.

**Современные тенденции развития электронно-лучевых технологий и оборудования.** На рисунке 6.4. показаны основные направления совершенствования технологий обработки электронным пучком, в частности, технологий сварки, сварки-пайки, размерной обработки и перфорации.

Например, использование высокочастотной пространственной развертки пучка, в том числе с растрами сложной формы, обеспечивает возможность проведения предварительного прогрева свариваемых деталей или после сварочной термической обработки. Применение технологий «многошовной» и «многованной» сварки путем одновременной модуляции токов отклоняющих катушек и тока луча, обеспечивает снижение сварочных деформаций. Внедрение различных технологий непрерывного слежения за стыком при электронно-лучевой сварке с использованием сигналов отраженных электронов и модуляции тока луча позволяет предотвратить возникновение дефектов сварного соединения, например,

непрояров. Повышение частот модуляции тока пучка применительно к технологии перфорации отверстий, позволяет получать более трех тысяч отверстий с минимальным диаметром 0,1 мм в металлических листах. Сварка и пайка тонкостенных или малогабаритных изделий сегодня может проводиться без механических перемещений с использованием растров.



**Рис. 6.4. Основные тенденции развития технологии электронно-лучевой сварки и обработки материалов**

Кроме того, существует постоянная тенденция к увеличению отношения глубины сварных швов к ширине, или глубины отверстий к диаметру. В последние десятилетия возник большой интерес к развитию технологий сварки-пайки разнородных материалов, в том числе пар материалов, при сварке которых вследствие термоЭДС возникают магнитные поля, отклоняющие электронный луч.

Приведенные тенденции обуславливают формирование новых требований к оборудованию, которые характерны для последнего десятилетия. Нужно отметить, что одновременно с технологией электронно-лучевой сварки существенные успехи достигнуты и смежных технологиях, реализуемых с применением сварочных электронных пушек и энергоблоков. Речь идет, прежде всего, о технологии электронно-лучевой перфорации (в западной терминологии более известной как электронно-лучевое сверление), а также весьма перспективного направления – электронно-лучевого формообразования путем сплавления металлических порошков или послойной наплавки валиков из присадочной проволоки (EBF технология).

*Направления электронно-лучевого формообразования путем сплавления металлических порошков или послойной наплавки валиков из присадочной проволоки (EBF технология)*

Поскольку обе технологии реализуемы на том же оборудовании, что и сварочные процессы, то при создании энергетического комплекса для электронно-лучевой сварки необходимо принимать во внимание требования указанных смежных технологий.

Развивающаяся элементная база, номенклатура материалов и постоянно растущие технологические требования не могут не сказываться на конструкции электронно-лучевых установок и их элементов. Можно выделить несколько основных направлений совершенствования электронно-лучевых технологических установок.

Конструкции электронных пушек и электронно-оптических систем за последние десятилетия изменились незначительно. Принципиально самыми востребованными остаются двух линзовые схемы и трехэлектродные электростатические генераторы, которые подробно рассмотрены в §6.2. Совершенствуются электронно-оптические характеристики пушек за счет корректирования формы электродов и их взаимного расположения. Используются новые изоляционные материалы – высоковольтная керамика, кремнийорганические жидкости, гибкая кабельная изоляция. При изготовлении деталей используются высокоточные станки с программным управлением. Благодаря этому разработчики постепенно уходят от использования дорогостоящих узлов – сложных металлизированных керамических изделий, механических систем юстировки для обеспечения соосности деталей пушки, узлов с вакуумной пайкой.

Непрерывно совершенствуются системы электропитания установок. Разработчики преследуют следующие цели – повышение точности и быстродействия регуляторов токов и напряжений и стабильности режимов их работы, снижение массы, габаритов, а также стоимости производства источников электропитания. Основной тенденцией в развитии электрооборудования электронно-лучевых установок сегодня является внедрение инверторных схем с импульсными трансформаторами, работающих на частотах 20–100 кГц, цифровых систем управления и переход к модульным решениям в области построения инверторных и трансформаторно-выпрямительных систем.

Развитие вакуумной техники также сказывается на конструкциях электронно-лучевых технологических установок. Установки с малогабаритными вакуумными камерами все чаще оснащаются безмасляными средствами откачки – турбомолекулярными, винтовыми и спиральными насосами. Для измерения остаточного давления применяют так называемые активные датчики, содержащие аналого-цифровые преобразователи и автономные системы управления, отключающие датчик при повышении давления выше допустимого для его работы. Все откачные средства, затворы и клапаны, и также датчики давления производители вакуумного оборудования оснащают цифровыми системами управления, использующими промышленные протоколы обмена данными.

В настоящее время для перемещения изделия относительно электронного пучка повсеместно внедряется шаговый и сервопривод, безредукторные механизмы линейного перемещения, шарико-винтовые пары, оптические датчики углового и линейного положения и программное управления приводом перемещения изделия.

Одной из основных тенденций развития электронно-лучевого технологического оборудования является непрерывное совершенствование систем управления технологическим процессом. Поскольку оборудование является технически сложным, содержит генераторы электронных пучков, источники питания высокого напряжения, вакуумные насосы, много-координатные механизмы перемещения оснастки и изделия, то подобные системы необходимы для защиты дорогостоящего оборудования от ошибок оператора, снижения трудоемкости эксплуатации и повышения воспроизводимости параметров технологических режимов. Для того, чтобы охватить такой широкий круг задач, и реализовать технически надежную систему, необходим многоуровневый подход в построении систем управления и защиты.

Так, блокировки и защиты от аварий, представляющих опасность для оператора и оборудования, выполняются на аппаратном уровне, а выполнение команд, которые могут привести к возникновению таких ситуаций, должно быть исключено и на программном уровне. Как показывает опыт создания автоматизированных систем управления электронно-лучевыми установками, в настоящее время в качестве элемента системы управления верхнего уровня целесообразно использовать промышленные компьютеры с программным комплексом, обеспечивающим безаварийную работу оборудования и программное управление технологическим процессом.

## **6.2. Принципы формирования электронных пучков и управления их характеристиками. Конструкции электронных пушек**

Основным элементом технологической электронно-лучевой установки является электронная пушка. Электронные пушки – это устройства для получения пучков электронов в технологическом вакууме. Многообразие конструкций электронных пушек объясняется существованием различных механизмов получения свободных электронов, формирования протяженных пучков, и управления их параметрами. Требования к конструкции пушек, применяемых в ЭЛУ, в основном продиктованы технологическими особенностями реализуемых процессов.

На рисунке 6.5 приведена схема формирования электронного пучка в трехэлектродной пушке. Это основной тип пушек, применяемых на сегодняшний день в технологических установках. Эмиттером свободных электронов является катод (К). Для формирования пучка, фокусировки и ускорения электронов, а

также для регулирования электронного тока, используются электрические поля, создаваемые системой электродов «катод – управляющий электрод – анод». Примерный вид траекторий электронов пучка и эквипотенциальных поверхностей ( $\mathcal{E}$ ) в сварочной электронной пушке показан на рис. 6.5. Конфигурация полей, создаваемых анодом (А) и управляющим электродом (УЭ), обеспечивает фокусировку электронного пучка за счет действия электростатических сил Лоренца  $F_{\text{э}}$ , направленных по нормали к эквипотенциальным поверхностям. Поперечные размеры электронного пучка в плоскости кроссовера как правило, намного меньше размеров катода. Поэтому для проведения процесса сварки в «кинжальном» режиме с помощью магнитной линзы (МЛ) проецируют на изделие (И) изображение кроссовера, а не катода. Условный диаметр пучка на изделии на рис. 6.5 обозначен как  $D_{\text{и}}$ . В некоторых конструкциях пушек кроссовер отсутствует, или является мнимым, т.е. расположенным выше катода.

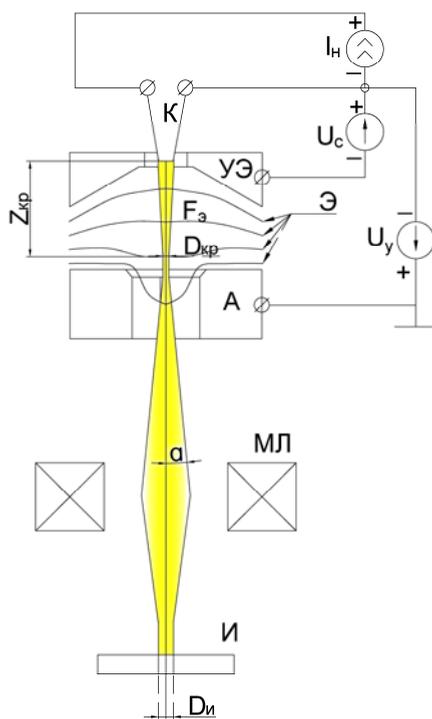


Рис. 6.5. Схема формирования электронного пучка в 3-х электродной пушке

Управляющий электрод также используется для регулирования тока электронного пучка. Анод имеет потенциал корпуса установки, катод – высокий отрицательный потенциал (обычно минус 30–100 кВ) относительно корпуса. Разность между потенциалами анода и катода называется ускоряющим напряжением  $U_{\text{а}}$ . Потенциал управляющего электрода изменяется от потенциала катода в сторону уменьшения потенциала. В случае, если потенциал управляющего элек-

трода меньше потенциала катода, вблизи катода существует так называемое «запирающее поле», препятствующее ускорению свободных электронов полем анода, и ограничивающее ток электронного пучка. Разность между потенциалом катода и управляющего электрода получила название «напряжения смещения»  $U_c$ .

Система, включающая в себя катод (К), управляющий электрод (УЭ) и анод (А) получила наименование «электростатический генератор», «электронный прожектор» или «иммерсионный объектив». Катод испускает свободные электроны, имеющие небольшие начальные скорости. Свободный, не связанный с атомом, электрон образуется при сообщении атому вещества некоторого избыточного количества энергии, в процессе поглощения которой электрон переходит на более удаленную от ядра орбиту и может при этом потерять связь с атомным ядром. В настоящее время в ЭЛУ для получения свободных электронов могут применяться различные физические принципы.

**Термоэлектронная эмиссия.** В основном в технологических ЭЛУ для получения свободных электронов используется явление испускания электронов твердыми телами при их нагреве выше определенной температуры. Подогрев катодов осуществляется либо прямым протеканием тока (прямокальные катоды), либо электронной бомбардировкой. Прямокальные катоды изготавливают из тугоплавких металлов – вольфрама и тантала. Катоды косвенного подогрева имеют форму «таблетки» и производятся из гексаборида лантана  $LaB_6$  (рис. 6.6).

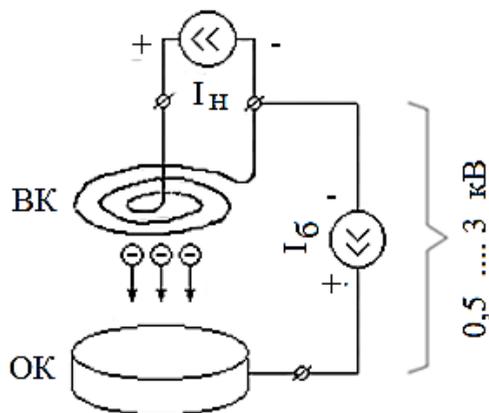


Рис. 6.6. Схема подогрева катода

Рабочая температура вольфрамовых катодов лежит в интервале от 2200 до 3000 К, а танталовых – от 2200 до 2800 К. К основным преимуществам термокатодов относится высокая стабильность эмиссионных характеристик и возможность регулирования тока эмиссии посредством изменения тока накала или тока бомбардировки. В качестве недостатка следует отметить тот факт, что катоды имеют ограниченный срок службы вследствие теплового, химического разрушения, а также под действием ионной бомбардировки.

Подогрев катода электронной бомбардировкой осуществляется в системе, напоминающей вакуумный диод (рис. 6.6). Между вспомогательным катодом прямого накала ВК (вспомогательного катода, чаще всего вольфрамового проволочного спирального) и основным катодом ОК (чаще всего из гексаборида лантана) прикладывается разность потенциалов, ускоряющая эмитированные электроны в направлении основного катода, при этом ток накала 10–20 А. Электроны бомбардируют катод, разогревая его до требуемой температуры. Ток бомбардировки стабилизируют. Напряжение бомбардировки 0,5–3 кВ.

Схема с электронной бомбардировкой применяется в тех случаях, когда требуется получение электронных пучков большой мощности (более 15 кВт). Применение этой схемы позволяет избежать необходимости передачи больших токов накала через кабели высокого напряжения. Рабочая температура у гексаборид-лантановых катодов ниже, чем у вольфрамовых и танталовых, и составляет 1600–1900 К. К основным недостаткам схемы с электронной бомбардировкой можно отнести более сложную конструкцию катодного узла пушки и наличие дополнительного стабилизированного источника питания в цепи бомбардировки. Обеспечение неизменной температуры основного катода осложнено тем, что в процессе работы основной катод подогревает вспомогательный за счет излучения, а эмиссионные характеристики обоих катодов изменяются из-за термохимического разрушения спирали и «таблетки».

Температура катода определяет величину тока эмиссии, и величину максимального тока пучка. В режиме насыщения ток электронного пучка может определяться по закону Ричардсона–Дэшмана:

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}, \quad (6.3)$$

где  $A$  – эмиссионная постоянная Зоммерфельда (константа Ричардсона–Дэшмана),  $e\phi$  – работа выхода электрона для данного материала,  $T$  – температура,  $k$  – Постоянная Больцмана. Закон Ричардсона–Дэшмана позволяет рассчитать плотность тока эмиссии только при условии, что напряженность электрического поля у поверхности эмиссии достаточна для того, чтобы удалить от нее все эмитировавшие электроны.

Температура катода определяет не только величину тока электронов в режиме насыщения, но и их начальную энергию. Обычно среднюю начальную энергию термоэлектронов определяют по выражению:

$$W_e = \frac{3}{2}kT, \quad (6.4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К,  $T$  – температура катода, К. Из-за неоднородности структуры эмиттера возникает разброс по начальным энергиям и углам выле-

та электронов. Распределение начальных скоростей по поверхности приводит к увеличению поперечных размеров электронного пучка в плоскости кроссовера, и соответственно, на изделии. Этот факт необходимо принимать во внимание при проектировании технологических электронных пушек.

**Эмиссия электронов из плазмы.** Электронная пушка с плазменным эмиттером содержит газоразрядное устройство, в котором генерируется плазма и создаются условия для выхода электронов в вакуум или газ низкого давления. Разрядная камера, в которой напряжение, приложенное к электродам, составляет 0,3–0,5 кВ, помещается в магнитное поле со средним значением индукции на оси системы 0,05–0,1 Тл. Под действием магнитного поля траектории электронов в плазме искривляются, а их путь удлиняется, что обеспечивает повышение эффективности ионизации рабочего газа. В дополнительном электроде (эмиттерном катоде) имеется эмиссионный канал, через который происходит отбор электронов. Эмиссионный канал располагается на оси разрядной камеры в области максимальной концентрации плазмы. Высокая концентрация плазмы позволяет получать необходимую величину тока электронной пушки при малых размерах эмиссионного канала.

**Автоэлектронная эмиссия.** Если повысить напряженность поля вблизи катода до  $10^8$  В/м, то для большинства металлов электроны можно извлекать из «холодного» катода посредством автоэлектронной эмиссии. Плотность тока при этом может достигать  $100$  А/см<sup>2</sup>. Если создать такую напряженность поля вблизи нагретой поверхности, то происходит «наложение» эффектов термоэмиссии и автоэмиссии. Автоэмиссионные катоды имеют форму иглы или конуса, и широко применяются в исследовательских приборах, и установках для микросварки с малыми токами пучка (до 1 мА), однако не находят применения в установках средней и высокой мощности.

**Ускорение электронов и формирование протяженного пучка.** Для ускорения эмитируемых катодом пушки электронов и формирования протяженных узких электронных пучков, часто называемых в литературе лучами, применяют электрические поля. Известно, что на электрон в электрическом поле с напряженностью  $\mathbf{E}$  действует сила:

$$F_3 = -e\mathbf{E}, \quad (6.5)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности поля, определяемый в каждой точке пространства градиентом электрического потенциала

$$\mathbf{E} = -\text{grad } U. \quad (6.6)$$

Сила  $F_3$  при действии поля на электрон будет направлена противоположно вектору напряженности, т.е. электрон будет ускоряться в направлении увеличения потенциала.

Допустив, что электрон стартует с катода с нулевой скоростью, и приняв, что разность потенциалов  $U_2 - U_1$  равна  $U$ , можно записать:

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (6.7)$$

Данное уравнение показывает, что кинетическая энергия, приобретенная электроном в области пространства, где существует градиент электрического потенциала, пропорциональна приложенной разности потенциалов и не зависит от протяженности поля, или локальных значений напряженности. Исключением здесь может являться только прикатодная область, если вблизи нее действует запирающее поле, или собственный заряд частиц, препятствующий ускорению электронов. В этом случае для формирования пучка в прикатодной области необходимо создать некоторую минимальную напряженность электрического поля. Область пространства, в которой происходит ускорение частиц, называется ускоряющим промежутком, а напряжение  $U$ , приложенное между катодом и анодом – ускоряющим напряжением. Область, в которой электроны движутся по инерции, и где отсутствует градиент потенциала, называют пространством дрейфа.

В электронной оптике, также, как и в физике плазмы, принято измерять энергию частиц в электронвольтах. Так как один электронвольт равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж, то получается, что энергия, приобретаемая электронами на ускоряющем промежутке, численно равна приложенному к промежутку ускоряющему напряжению в вольтах.

Система, состоящая из подогреваемого катода и анода, представляющая собой вакуумный диод приведена на рис. 6.7а). При увеличении анодного (ускоряющего) напряжения диода, анодный ток  $I_A$  возрастает до некоторого максимального значения, называемого током насыщения (рис. 6.7б). Это означает, что почти все электроны, покидающие катод, достигают анод, поэтому дальнейшее увеличение напряженности поля не может привести к увеличению тока пучка. Максимальный достижимый ток вакуумного диода ограничен током термоэлектронной эмиссии, плотность которого описывается законом Ричардсона–Дэшмана (6.3).

В случае если напряженность поля недостаточна для удаления с катода всех эмитированных электронов, происходит ограничение анодного тока полем пространственного заряда электронов. Плотность тока эмиссии  $j_{e0}$ , ограниченно-го пространственным зарядом, пропорциональна анодному напряжению в степени  $3/2$  и определяется по закону Чайлда–Ленгмюра:

$$j_{e0} = 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot G \cdot U_A^{\frac{3}{2}}, \quad (6.8)$$

где  $G$  – коэффициент, зависящий от геометрии электродов,  $m^{-2}$ ; для простейшего случая плоскопараллельных электродов  $G = 1/l^2$ , где  $l$  – расстояние анод-катод.

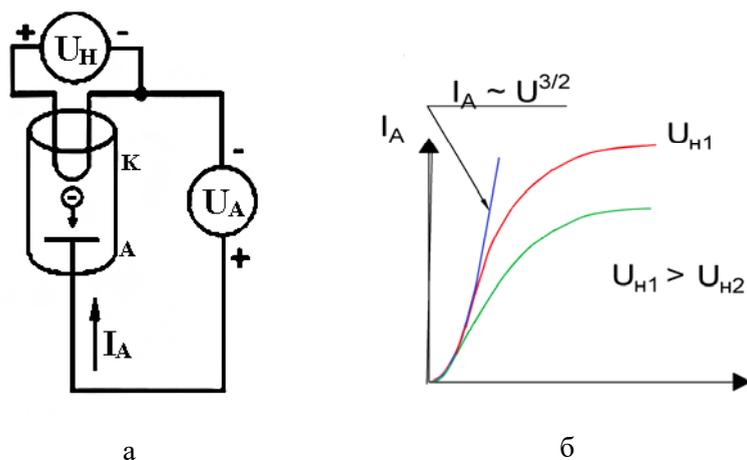


Рис. 6.7. Схема (а) и ВАХ (б) вакуумного диода

Пример вакуумного диода показывает, что ток электронного пучка можно регулировать путем изменения как анодного напряжения, так и температуры катода.

Теперь следует перейти к пространственным характеристикам формируемого пучка. Основываясь на существующей в электронной оптике аналогии между движением электронов в электрических полях и распространением световых лучей в прозрачных средах, введем понятие электронных линз. На практике для построения линз применяются электрические поля с непрерывным изменением потенциала и напряженности, так как только такие поля могут быть созданы электродами, расположенными за пределами пучка. Поэтому в технологических ЭЛУ для фокусировки электронных пучков в качестве **линз** используют **неоднородные электрические и магнитные поля, имеющие симметрию тел вращения**.

В ЭЛУ обычно используются узкие приосевые пучки электронов. В этом случае нет необходимости исследовать поле вдали от оси системы, так как на формирование пучка оказывает влияние лишь приосевое (параксиальное) поле.

Обычно принимают два условия параксиальности.

1. Удаление траекторий от оси симметрии очень мало, так, что величина  $r$  много больше, чем  $r^2$ .

2. Угол наклона траекторий к оси симметрии на всем их протяжении настолько мал, что можно считать проекцию скорости электронов на эту ось  $v_z$  равной самой скорости  $v$ .

Известно, что радиальная составляющая напряженности электрического поля прямо пропорциональна радиальной координате  $r$ , т.е. линейно растет с удалением от оси, а на оси обращается в нуль. Составляющая  $E_r$  формирует радиальную составляющую силы Лоренца, которая перемещает электрон к оси (фокусирует пучок) и при  $U_0 > 0$  (нарастание напряженности поля вдоль оси),

или перемещает электрон от оси (расфокусирует пучок) при  $U_0 < 0$ . Известно, что **аксиально-симметричное электрическое поле является электронной линзой**, собирающей, или рассеивающей, в зависимости от знака второй производной распределения потенциала вдоль оси симметрии.

Ускорение, сообщаемое электрону силой Лоренца в радиальном направлении:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_r \approx -\frac{e}{m} \frac{1}{2} U_0''(z) r, \quad (6.9)$$

а в осевом направлении

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{e}{m} U_0'(z). \quad (6.10)$$

В соответствии со вторым условием параксиальности, скорость, приобретаемую электронами в направлении оси симметрии можно приближенно считать равной их полной скорости, определяемой величиной потенциала на оси в соответствии с выражением:

$$\frac{dz}{dt} \approx v = \sqrt{\frac{2e}{m} U_0(z)}, \quad (6.11)$$

причем данное выражение справедливо при  $\left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = 0$ , т.е. в случае, когда электрон в начальной точке движения с потенциалом на оси  $U_0(0) = 0$  имеет нулевую скорость.

Опуская промежуточные выкладки получаем выражение для расчета траектории электрона в аксиально-симметричном электрическом поле, получившем название **основного уравнения электронной оптики для электрического поля**:

$$r''(z)U_0(z) + \frac{1}{2}r'(z)U_0'(z) + \frac{1}{4}r(z)U_0''(z) = 0. \quad (6.12)$$

Данное уравнение показывает важные свойства электронных линз, образованных аксиальными электрическими полями.

1. В параксиальном приближении расчет траекторий частиц может проводиться только по распределению потенциала вдоль оси симметрии системы (линзы, пушки).

2. В уравнение 6.12 не входят ни масса, ни заряд частиц. Это позволяет провести еще одну аналогию между световой и электронной оптикой, и получить целый ряд простых выражений для расчета геометрических параметров электронных пучков, непосредственно связывающих траектории лучей с аналогами

оптических показателей преломления – распределениями электрических потенциалов и их производных. Однако это вовсе не означает, что в реальности частицы с различными массами и зарядами будут двигаться по идентичным траекториям. Для одинаково заряженных частиц с различными массами траектории будут совпадать только в случае равенства начальных энергий, при этом время пролета поля будет, естественно, отличаться.

3. Уравнение линейно и однородно как относительно  $U(z)$ , так и относительно  $r(z)$ . Отсюда следует, что пропорциональное изменение потенциалов всех электродов, образующих линзу, не будет влиять на траектории, а также то, что при изменении линейных размеров электродов, траектории частиц будут оставаться геометрически подобными.

В паракиальной электронной оптике, использующей прямую оптико-механическую аналогию, обычно не проводят расчеты всего множества траекторий частиц в поле, создаваемом электродами. Это позволяет упростить анализ электронно-оптических систем, применяя те же простые аналитические выражения, которые используются для описания прохождения лучей света сквозь световые линзы. В таком случае электронная линза полностью определяется, если известны положения ее главных фокусов (точки  $F_1$  и  $F_2$ ) и главных плоскостей (точки  $H_1$  и  $H_2$ ).

В случае, если  $U_1 < U_2$ , при прохождении линзы скорость электронов будет увеличиваться (ускоряющая линза), а если  $U_1 > U_2$  – скорость их будет уменьшаться (тормозящая линза). Иммерсионная линза имеет области положительной и отрицательной второй производной потенциала, т.е. имеет собирающую и рассеивающую части поля. Однако, так как рассеивающую область электрон проходит быстрее, то количество движения, переданное ему в радиальном направлении к оси оказывается больше, чем от оси. Поэтому иммерсионная линза всегда является собирающей.

В технологических электронных пушках катод помещен непосредственно в поле иммерсионной линзы ускоряющего типа, и эта система получила название иммерсионного объектива. Первой, собирающей диафрагмой линзы, является управляющий электрод, а второй, рассеивающей и ускоряющей – анод.

Используя теорему Лагранжа–Гельмгольца, ограничившись малыми углами, можно записать:

$$r_u = \frac{r_k \alpha_1 \sqrt{U_1}}{\alpha_2 \sqrt{U_2}}, \quad (6.13)$$

где  $r_k$  – радиус катода (объекта),  $r_u$  – радиус промежуточного изображения катода,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – апертурные углы со стороны катода и его изображения,  $U_1$  и  $U_2$  – потенциал в прикатодной области и в области изображения (рис. 6.8).

Для уменьшения сечения луча в плоскости изображения ( $r_u$ ) нужно либо уменьшать множители, входящие в числитель, либо наоборот, увеличивать множители, входящие в знаменатель выражения 6.13. Например, уменьшить размер изображения катода можно либо путем уменьшения размеров катода, либо путем увеличения разности потенциалов  $U_2-U_1$ , либо путем изменения соотношения апертурных углов, величина которых связана с линейными размерами объектива.

Естественно, что в реальном случае все электроны покидают катод с различными начальными углами вылета, и так как их начальные скорости не равны нулю, они будут пересекать оптическую ось на различном расстоянии от катода. В результате будет формироваться некоторое минимальное сечение пучка радиусом  $r_c$ , совпадающее с плоскостью скрещения траекторий. Более того, прикатодную иммерсионную линзу, имеющую фокусирующий и ускоряющий промежутки, нельзя считать тонкой. В такой линзе потенциал меняется непрерывно на всем интервале ускоряющего промежутка, а траектории частиц будут искривлены, что и показано на рис. 6.8.

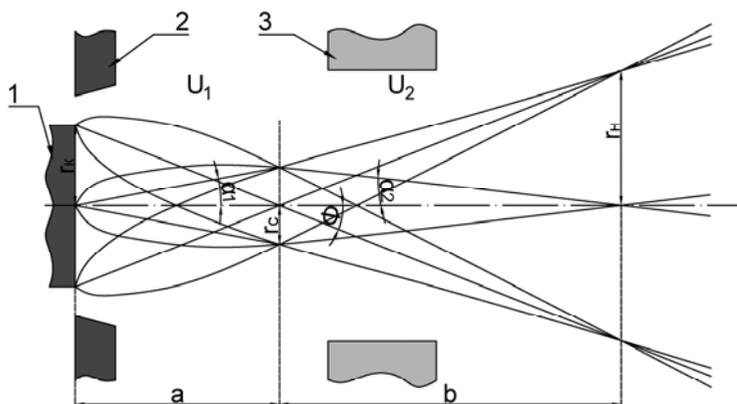


Рис. 6.8. Иммерсионный объектив (трех электродная электронная пушка)

Рассматривая фокусировку электронных пучков, необходимо также учитывать собственные заряды электронов, которые создают силы, расталкивающие частицы в пучке. Действие пространственного заряда в пучках удобно характеризовать обобщенной характеристикой, получившей название **первеланса**:

$$P_{\text{пр}} = \frac{I}{U^{3/2}}. \quad (6.14)$$

Исследование электронных пучков показало, что влияние собственного электрического поля пучка начинает заметно сказываться на движении электронов при  $P_{\text{пр}} \geq 10^{-8} \text{ A/V}^{3/2}$ . По выражению (6.14) можно определить пороговые значения токов электронного пучка для различных ускоряющих напряжений

(см. табл. 6.1) Следует иметь в виду, что формула (6.14) позволяет оценивать действие объемного заряда только в пространстве дрейфа электронов, за пределами ускоряющего промежутка.

Таблица 6.1

**Максимальные «пороговые» значения тока пучка  
для различных ускоряющих напряжений,  
при которых можно не учитывать влияние пространственного заряда**

$U$ , кВ	25	50	75	150
$I_{кр}$ , мА	40	112	205	581

Для точного моделирования формирования электронных пучков необходимо учитывать расталкивающее действие объемного заряда, особенно сильно влияющее на форму траекторий частиц в прикатодной области. Также, из-за действия собственного заряда на оси пучка вблизи катода формируется область с низким потенциалом, и создаваемое в этой области «тормозящее поле» препятствует движению электронов с катода. Это приводит не только к уменьшению тока электронного пучка, но и к искажению формы распределения плотности тока по его сечению.

Механизм создания «запирающего поля» у поверхности катода используется в большинстве типов электронных пушек.

Для этого необходимо изменять потенциал управляющего электрода (первой диафрагмы иммерсионной линзы) относительно катода, или напряжение смещения. Так как источник напряжения смещения работает только в режиме холостого хода, то такой способ регулирования является наиболее энергетически эффективным.

На рисунке 6.9 проиллюстрирован принцип регулировки тока пучка полем, создаваемым управляющим электродом (первой диафрагмой иммерсионной линзы).

В случае если потенциал управляющего электрода равен потенциалу катода ( $U_c = 0$  на рис. 6.9), пушка работает в диодном режиме, и ток пучка имеет максимальное значение. Весь катод охвачен ускоряющим полем, и возможное ограничение тока может быть вызвано либо насыщением, либо расталкивающим действием собственного поля электронов (обычно в центре пучка).

Если потенциал управляющего электрода регулировать в сторону уменьшения относительно потенциала катода, периферийная часть катода становится охваченной запирающим полем, препятствующим ускорению электронов с поверхности катода, и ток пучка уменьшается. В предельном случае запирающее поле охватывает весь катод, и ток пучка становится равным нулю. Соответству-

ющее этому режиму значение напряжения смещения ( $U_c = -1000$  В на рис. 6.9) называется запирающим напряжением. А сама зависимость тока пучка от напряжения смещения  $I_p(U_c)$  – вольтамперной или модуляционной характеристикой электронной пушки для данного ускоряющего напряжения и температуры катода.

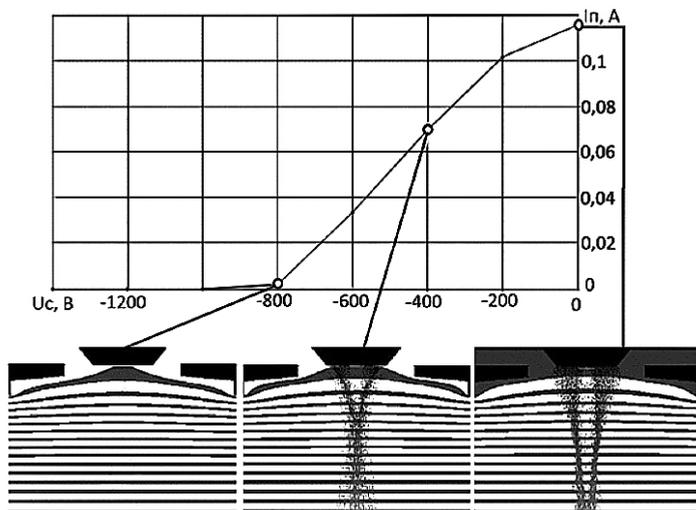


Рис. 6.9. Принцип регулировки тока потенциалом управляющего электрода

На рисунке 6.10. приведено семейство вольтамперных характеристик электронной пушки ЭЛА-50/5М, полученных экспериментально с источником электропитания ИВЭП-60/4.

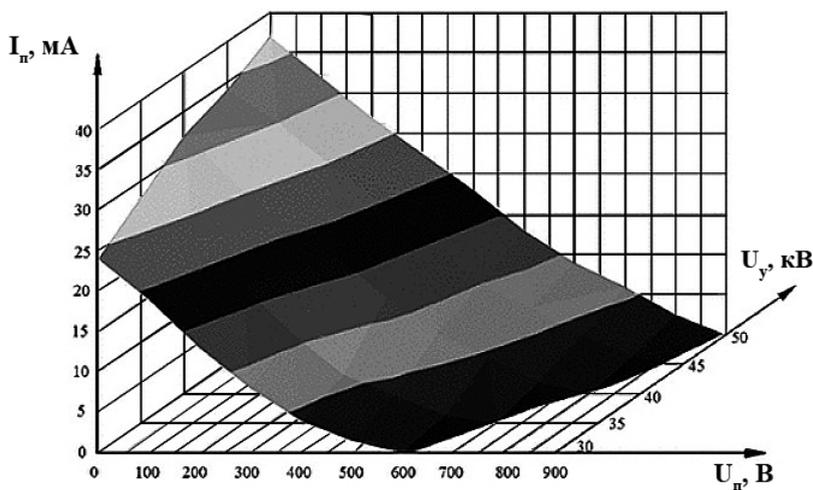


Рис. 6.10. Семейство ВАХ пушки ЭЛА-50/М

При изменении потенциала управляющего электрода изменяется конфигурация поля в прикатодной области, что влияет одновременно на размеры «пятна эмиссии» катода и на положение кроссовера. На рисунке 6.11 показаны зависимости положения кроссовера  $Z_{кр}$  и его диаметра  $D_{кр}$ , от напряжения смещения для установки ЭЛА-50/5М, полученные при ускоряющем напряжении 50 кВ с помощью математической модели. На данном рисунке показаны: кривая 1 – ток пучка  $I_n$ , А; кривая 2 – положение кроссовера  $Z_{кр} \cdot 10$  см; 3 – диаметр  $D_{кр}$  кроссовера, мм. При увеличении напряжения смещения ток пучка падает, кроссовер смещается в сторону катода, а его диаметр изменяется нелинейно: сначала уменьшается (на интервале 100–700 В), а затем незначительно возрастает.

Плотность тока электронного пучка в кроссовере также нелинейно зависит от напряжения смещения и обычно имеет максимум. Поэтому очевидно, что положение плоскости фокусировки и размеры пятна в фокальной плоскости нагрева при регулировании тока будут изменяться.

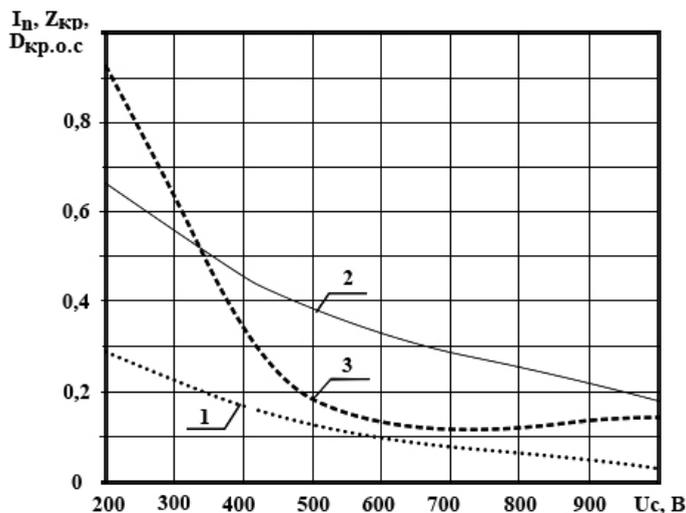


Рис. 6.11. Влияние напряжения смещения на характеристики электронного пучка

По этой причине для обеспечения независимой регулировки тока пучка и поперечных размеров электронного пучка, необходима установка второй линзы. Причем выгодно настраивать эту линзу так, чтобы она проецировала на обрабатываемое изделие не изображение катода, а фокус первой линзы в пространстве изображения – кроссовер, имеющий радиус  $r_c$  на рис. 6.8. В этом случае в плоскости изделия достигается максимальная плотность тока электронного пучка.

В технологических электронных пушках в качестве таких линз используют «короткие» магнитные линзы, т.е. такие, эффективная протяженность поля которых вдоль оси электронного пучка существенно меньше расстояния между крос-

совером и уровнем фокусировки пучка на изделии. Локализация магнитного поля на коротком участке оси электронной пушки предотвращает наложение этого поля на поле эмиссионных и отклоняющих систем, и тем самым, возникновение дополнительных aberrаций фокусировки и отклонения. Для тонкой линзы можно записать:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \tag{6.15}$$

где  $a$  – расстояние от объекта (кроссовера) до средней плоскости линзы,  $b$  – расстояние от средней плоскости линзы до изображения (изделия). Зная фокусное расстояние линзы, и расстояние от ее средней плоскости до кроссовера, можно рассчитать расстояние от линзы до изделия, обеспечивающее минимальный размер пятна нагрева при заданном токе фокусировки линзы

$$b = \frac{\alpha f}{\alpha - f}. \tag{6.16}$$

На рисунке 6.12 показана схема фокусировки электронного пучка полем тонкой линзы в двух случаях. На рисунке 6.12а представлен идеальный случай при влияние собственного объемного заряда пучка, причем разброс по углам вылета и тепловым скоростям электронов не учитывается. В таком случае кроссовер пучка представляет собой точку, размер которой практически равен размеру электрона. Траектории электронов, входящих в поле линзы, образуют конусы с общей вершиной в точке кроссовера. В случае, если линза также идеальна, можно пренебречь влиянием хроматической и сферической aberrации. На рисунке 6.12б показан реальный случай, при этом К – катод пушки; Кр – плоскость кроссовера пучка; Л – плоскость линзы; И – плоскость изделия.

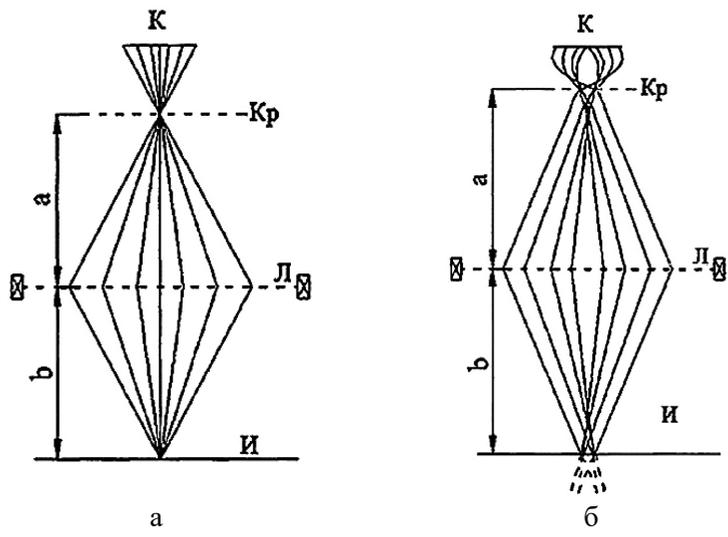


Рис. 6.12. Схема фокусировки электронного пучка в электронной пушке

Плотность тока электронного пучка в кроссовере также нелинейно зависит от напряжения смещения и обычно имеет максимум. Поэтому очевидно, что положение плоскости фокусировки и размеры пятна в фокальной плоскости нагрева при регулировании тока будут изменяться. Электроны покидают катод с различными начальными скоростями, и имеют различные углы вылета. Из-за воздействия собственного отрицательного заряда, при движении на малых скоростях, электронный пучок расширяется. Эти факторы, а также влияние аберраций электронно-оптической системы пушки, приводят к тому, что реальные траектории электронов не являются прямыми, а кроссовер представляет собой пятно, имеющее размеры намного большие, чем размер электрона.

Если продлить траектории частиц, входящих в поле магнитной линзы, то вершины воображаемых «конусов» не будут совпадать. В существующих технологических пушках диаметр кроссовера изменяется в пределах 10–500 мкм. Но диаметр пучка в плоскости изделия чаще всего превосходит эту величину. Это обусловлено влиянием аберраций линзы, а также эффектом увеличения. Чем дальше изделие расположено от линзы, тем больше будет минимально возможный диаметр пучка.

При приближении изделия к линзе, минимальный диаметр пучка на изделии будет уменьшаться. Однако, при этом будет возрастать апертурный угол, что является отрицательным фактором с технологической точки зрения. Кроме того, конструировать технологические пушки, у которых расстояние линза – кроссовер превосходит расстояние линза – изделие, нерационально, так как размеры колонны будут неоправданно большими.

Из изложенного следует, что при разработке технологических электронных пушек необходимо обеспечивать минимальный размер изображения катода со стороны магнитной линзы, т.е. диаметр пятна, образованного мысленным продолжением траекторий частиц, входящих в поле линзы. Для определения этого параметра не столь важно положение реального кроссовера пучка и его диаметр. Наиболее важен сравнительный анализ распределений плотности тока электронного пучка в пространстве дрейфа электронов.

Таким образом, если ток пучка в процессе сварки регулируется в широких пределах, то ток магнитной фокусирующей линзы необходимо корректировать для сохранения плотности мощности источника нагрева на заданном значении.

**Принципы магнитной фокусировки электронных пучков.** Для фокусировки электронных пучков применяют магнитные поля с осевой симметрией. Устройства, создающие такие поля, выполняются в виде цилиндрической катушки, по которой протекает постоянный ток, с магнитопроводом. Магнитопровод имеет зазор в области прохождения пучка. Такая конструкция обеспечивает увеличение градиента индукции магнитного поля вдоль оси, что повышает оптическую силу линзы. В этом случае, магнитное поле не совершает работы, а лишь искривляет траекторию движения частицы, не меняя ее энергии. Отсюда следу-

ет, что только применение магнитных линз позволяет регулировать плотность теплового потока, воздействующего на изделие, не влияя на саму величину потока, что обеспечивает независимый принцип управления процессом.

Из анализа математического описания электронного пучка видно, что с ростом ускоряющего напряжения фокусное расстояние  $f$  будет увеличиваться. Для компенсации «ухода фокуса» при регулировании напряжения (или тока пучка) необходимо скорректировать ток фокусировки, определяющий величину индукции на оси системы.

**Отклонение электронного пучка.** Для отклонения электронных пучков в пространстве используются магнитные отклоняющие системы. Они представляют собой системы электромагнитов (в простейшем случае магнитные двухполюсники), создающие магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно электронному пучку. Отклоняющие системы могут выполняться по различным схемам. На рисунке 6.13 показаны типичные отклоняющие системы, применяемых в технологических ЭЛУ: а – магнитным двухполюсником; б – с четырехполюсником при последовательном сложении магнитных полей; в – с четырехполюсником при параллельном сложении магнитных потоков, на рис. 6.13 показаны: 1 – обмотки; 2 – магнитопровод; 3 – электронный пучок, причем обмотки на которые подано напряжение – заштрихован. Если пучок нужно отклонять только вдоль одного направления, и частота отклонения не превышает 10–50 Гц, то система выполняется по схеме рис. 6.13а, магнитопровод обычно изготавливается из шихтованной стали. Если же требуется производить отклонение электронного пучка внутри телесного угла (круговая, спиральная, X-образная, строчная развертка), то используют отклоняющие системы, изображенные на рис. 6.13б и в.

Предельная частота развертки пучка в таких системах может превышать несколько килогерц, поэтому магнитопровод в них выполняют из феррита. Отклоняющая система, изображенная на рис. 6.13б выполнена по схеме с последовательным сложением магнитных потоков и внешним магнитопроводом. Такая конструкция экономична, поскольку для отклонения пучка используется основной магнитный поток. Отклоняющая система, показанная на рис. 6.13в, выполнена по схеме с параллельным сложением магнитных потоков и внутренним магнитопроводом. Она менее экономична, так как пучок отклоняется полем рассеяния, однако обладает существенным преимуществом – более равномерным распределением поля в области пучка. Все описанные выше процессы генерации электронных пучков и управления их пространственными и энергетическими характеристиками реализуются в современных конструкциях электронных пушек, отличающихся назначением и условиями эксплуатации. Поэтому конструктивное исполнение элементов, входящих в состав пушки, может быть различным.

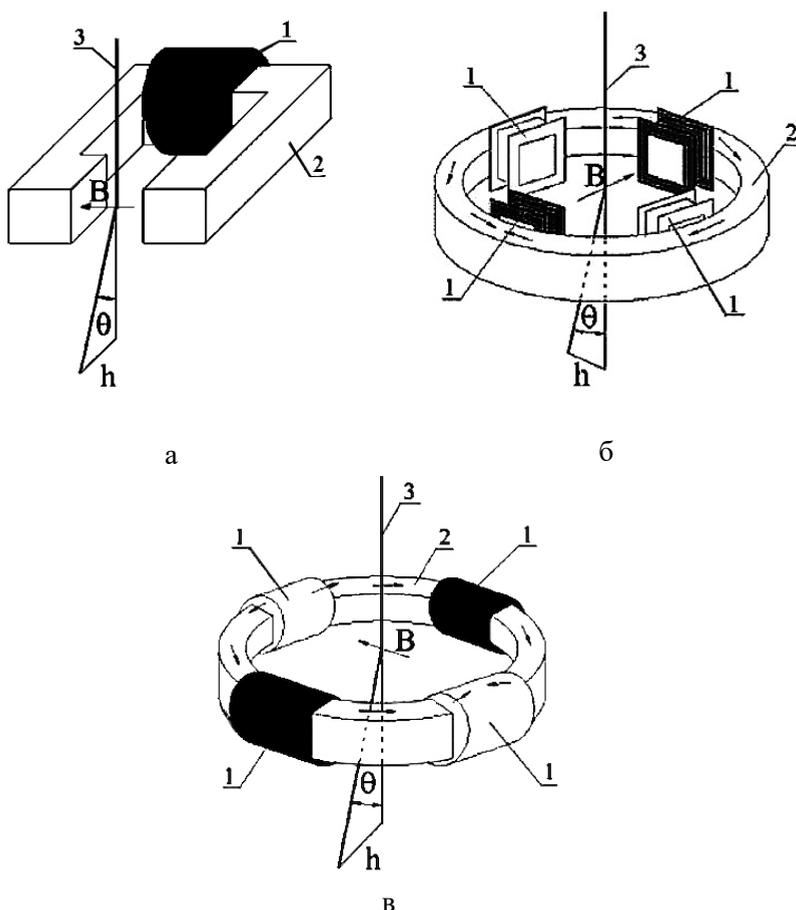


Рис. 6.13. Типичные отклоняющие системы технологических ЭЛУ

Если по технологическим требованиям необходимо осуществлять тепловой прогрев довольно больших поверхностей в отклоняющей системе предусматривается развертка по заданной программе.

### 6.2.1. Электронно-лучевые печи с кольцевым катодом

В установках с кольцевым катодом обычно источником электронов является вольфрамовый катод, выполненный из проволоки, через которую пропускают переменный ток от накаливающего трансформатора. Конструкции таких установок хорошо известны [6]. Данные установки имеют мощностью  $N = 60 \div 225$  кВт с рабочим напряжением  $U_{\text{раб.}} = 4-12$  кВ. Они применяются в основном для выплавки слитков тугоплавких металлов диаметром до 100 мм.

Так как жидкий металл имеет высокую температуру и интенсивно излучает тепло, для защиты от перегрева стенки вакуумной камеры и технологические узлы установки охлаждаются проточной водой.

Под влиянием бомбардировки ускоренными электронами осуществляется нагрев и плавление торца расходуемой заготовки, а расплавленный металл стекает при этом в водоохлаждаемый медный кристаллизатор, где создается ванна жидкого металла, подогреваемая электронными лучами. По мере плавления расходуемой заготовки осуществляют вытягивание формируемого слитка со скоростью, обеспечивающей поддержание постоянного уровня жидкой ванны в кристаллизаторе.

Важной составной частью электронно-лучевой установки является высокопроизводительная вакуумная система, от которой зависит эффективность работы электронно-лучевых пушек. Вакуумная система включает в себя последовательно соединенные высоковакуумные диффузионные или бустерные паромасляные насосы, а также вакуумные затворы и систему управления.

На рисунке 6.14 показаны две основные схемы данных установок и изображены: 1 – кольцевой катод; 2 – расходуемый электрод; 3 – фокусирующее устройство (экран); 4 – кристаллизатор водоохлаждаемый; 5 – жидкая ванна; 6 – электронный луч; 7 – закристаллизовавшийся слиток; 8 – плавильная камера.

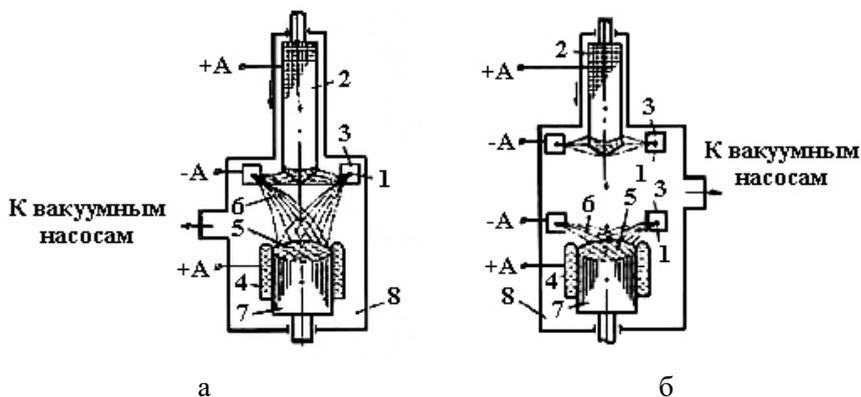


Рис. 6.14. Схемы ЭЛУ с кольцевым катодом

Преимуществом установок с кольцевым катодом является простота конструкции излучателя электронов. Кроме того, по сравнению с другими установками они отличаются более высоким КПД (15–40%), так как расход энергии на плавление в них на 10–15% меньше. Это объясняется тем фактом, что к нагреваемому металлу приложен положительный потенциал, поэтому исключается отражение электронов от поверхности металла.

Однако, наряду с очевидными преимуществами, установки с кольцевым катодом имеют серьезный принципиальный недостаток – нестабильность в работе. Это обусловлено в основном двумя причинами:

1. Так как катод расположен близко к поверхности обрабатываемого металла, при повышении газовыделений возможно возникновение дуги, что может привести к выходу из строя катода и электрооборудования установки.

Для предупреждения дуговых разрядов (пробоев), необходимо применять сложную систему автоматического регулирования, обеспечивающую резкое снижение напряжения при повышении тока. Но в этом случае нарушается баланс тепла, поступающего к кристаллизующемуся слитку, и стабильность процесса кристаллизации.

Другой мерой предупреждения возникновения дуги является использование вакуумной системы с большой производительностью насосов, что приведет к значительному удорожанию установки.

Близкое расположение катода от металла является причиной попадания на катод паров переплавляемого металла. При этом поверхность катода «отравляется» и он теряет эмиссионную способность. К тому же попадание на катод паров легкоплавкого металла вызывает его перегорание, поэтому срок службы кольцевых катодов ограничен и составляет всего несколько часов. Выход катода из строя прерывает плавку, отражается на производительности установки и отрицательно сказывается на качестве металла.

### ***6.2.2. Установки с радиальной пушкой***

Конструкция радиальной пушки описана в [6], её нагреватель имеет линейный (или П-образный) катод из вольфрамовой проволоки, размещенный в щели фокусирующего прикатодного электрода и водоохлаждаемый ускоряющий анод, причем ускоряющий анод выполнен в виде призмы с углом  $135^\circ$  и имеет центральный канал в виде прорези шириной 2–4 мм для прохождения пучка электронов. Между катодом и анодом приложено ускоряющее напряжение 8–15 кВ, обеспечивающее формирование плоского электронного луча.

Плоско-лучевые нагреватели смонтированы в общем корпусе радиальной пушки в количестве 4–10 шт. Это позволяет создавать радиальные пушки разной мощности, мощности от 15 до 150 кВт. Нагреватели располагаются по кругу (кольцу), поэтому эти пушки еще называются электронными пушками кольцевого типа. В зависимости от технологических и конструкторских особенностей в них формируются пучки: кольцевой плоской формы, конусообразной без дополнительной фокусировки и конусообразной с фокусировкой пучка.

Схема плавильных установок с радиальными пушками аналогична схеме установки с кольцевым катодом. Отличие заключается в том, что катод выполняют не в виде единого кольца, а расчлененным на несколько участков (плоско-лучевых нагревателей), работающих параллельно, а положительный потенциал прикладывается не к нагревательному объекту (переплавляемой заготовке), а к специальному ускоряющему электроду – аноду, в котором имеется узкая щель для прохождения электронного луча.

Благодаря этому катодное пространство отделено от плавильного объема анодом, узкая щель которого выполняет роль диафрагмы и препятствует попаданию в объем формирования луча выделяющихся из металла газов и паров. Это в значительной мере предотвращает возможность перехода электронного разряда в дуговой и увеличивает срок службы катода.

Кроме того, для увеличения надежности работы плавильных пушек в конструкции некоторых из них предусмотрена возможность отклонения (поворот) электронного луча электромагнитной системой, расположенной за ускоряющим анодом плоско-лучевого нагревателя. Это исключает прямое попадание на электроды брызг и паров металла и одновременно увеличивает технологические возможности установки, так как, изменяя угол отклонения луча, можно на одной и той же установке выполнять плавление слитков разного диаметра. Например, отклонение луча в существующих плоско-лучевых пушках для разработок института электросварки им. Б.О. Патона составляет  $60^\circ$ .

Основные преимущества таких установок: отсутствие электронного поля в плавильной зоне; стабильная и надежная работа.

### ***6.2.3. Установки с аксиальной пушкой***

Электронные пушки с катодом прямого накала в основном применяются для сварки, пайки, резки и термообработки малогабаритных изделий. Мощность источников питания таких пушек обычно не превышает 10-15 кВт. На рисунке 6.15. показана конструкция электронной пушки ЭЛА-50/5М с источником питания мощностью 5 кВт.

Блок катода 1 с помощью экрана-гайки 2 закрепляется на нижнем торце высоковольтного изолятора. Верхний торец изолятора спаивается с герметизирующим фланцем, который присоединяется к корпусу откидывающейся части электронной пушки.

Внутри откидывающейся части электронной пушки образуется герметичная полость, которая заполняется жидким диэлектриком. Сверху полость закрывается резиновой мембраной 3, которая лежит на перфорированном диске 4. Полость сообщается с атмосферой через отверстия в винтах верхней крышки 5, что не препятствует расширению масла при его нагреве или высоковольтном пробое в её объеме. Это конструктивное решение предохраняет высоковольтный изолятор от разрушения.

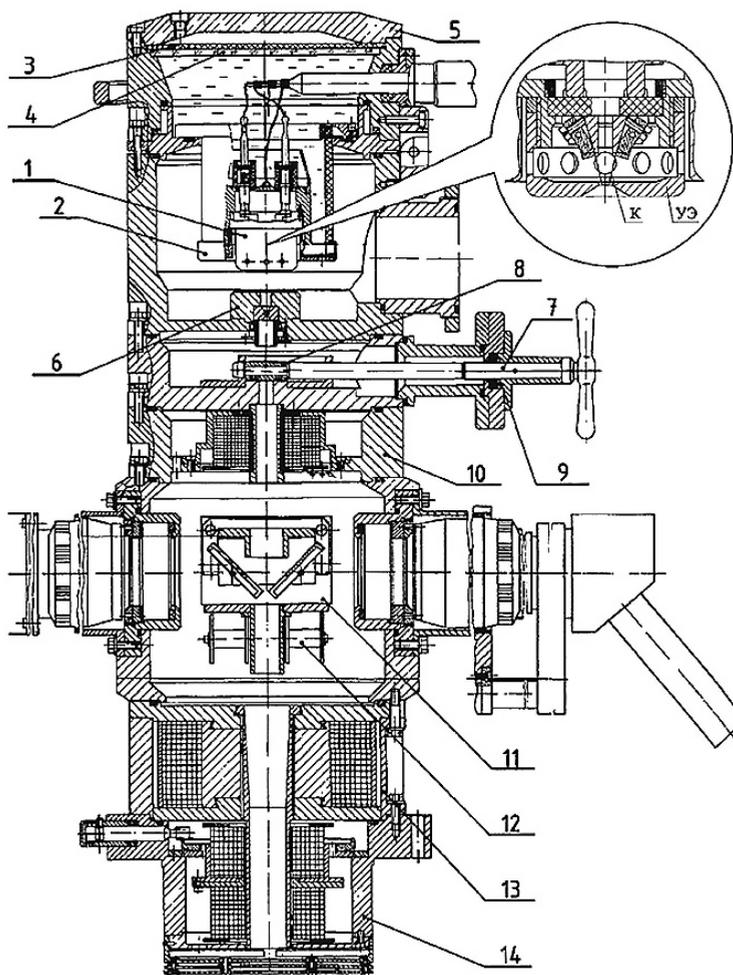


Рис. 6.15. Конструкция электронной пушки ЭЛА-50/5М

Электропитание пушки осуществляется через высоковольтный кабель, распаянные проводники которого изолируются жидким диэлектриком. Анод пушки 6 находится под потенциалом земли и крепится непосредственно к корпусу.

Для обеспечения электрической безопасности в пушку встроена блокировка питания, которая срабатывает при откидывании головной части. В пушку встроены теплообменники, по которым можно подавать воду для дополнительного охлаждения посадочного места катодного узла. Подвод и слив воды осуществляется через два штуцера, ввернутых в корпус.

Ленточный катод (К), изготовленный из вольфрамовой или танталовой фольги толщиной 50 мкм, зажимается винтами в катододержателях, к которым подводится питание накала. Управляющий электрод УЭ навинчивается на катодный узел 1. Сменные кольца позволяют регулировать расстояние катод-управляющий электрод.

Объем пушки отсекается при напуске атмосферного воздуха в объем рабочей камеры с помощью отсечного клапана, расположенного за анодом. Шток 7 перемещает крышку 8, для прижима которой к уплотнению установлен специальный механизм. Герметизация механического ввода обеспечивается уплотняющим кольцом 9.

Под электронной пушкой находится блок юстировки 10, который позволяет устранять возможные отклонения электронного луча относительно оптической оси фокусирующей линзы расположенной внизу. При отсутствии юстировки фокусировка луча вызывает перемещение пучка по поверхности изделия. Основным элементом юстирующей системы является тороидальная секционированная катушка, состоящая из двух обмоток, отклоняющих электронный луч по взаимно перпендикулярным направлениям.

Ниже юстирующего блока находится блок оптический. Оптический блок имеет две ветви: наблюдения и подсветки. В ветви наблюдения формируется увеличенное место сварки. Через ветвь подсветки световым пучком освещается место сварки. Наблюдение через оптический блок позволяет проводить технологический процесс в местах недоступных для наблюдения через смотровое окно камеры. В состав блока входят осветитель, два фотообъектива, оптическая головка микроскопа, узел зеркал 11 и узел защиты 12. Источником света в осветителе служит кварцевая лампа.

Фотообъектив формирует световой поток, который через защитное свинцовое стекло ТФ5 попадает на зеркало и далее на объект наблюдения. Свет, отраженный от объекта наблюдения, попадает на второе наклонное зеркало и от него в объектив.

Этот объектив формирует уменьшенное изображение объекта, наблюдение которого осуществляется с помощью оптической головки микроскопа. Головку можно перемещать вдоль оптической оси, обеспечивая необходимую фокусировку.

Технические характеристики ЭЛА-50/5М приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

### Характеристики агрегата ЭЛА-50/5М

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение, кВ	30, 40, 50
Максимальный ток нагрузки, А	0,1
Ток накала, А	0–20
Напряжение накала, В	0–7
Напряжение смещения, В	0–1000
Размеры эмитирующей площадки катода, мм × мм	1×1; 1,5×1,5; 2×2
Ток фокусировки, А	0–1,1
Сопротивление фокусирующей катушки, Ом	14
Число витков фокусирующей катушки	1500
Рекомендуемое расстояние от средней плоскости линзы до изделия, мм	300–400
Ток отклоняющей / юстирующей системы, А	0–0,4
Сопротивление отклоняющей катушки, Ом	5
Сопротивление юстирующей катушки, Ом	2,5

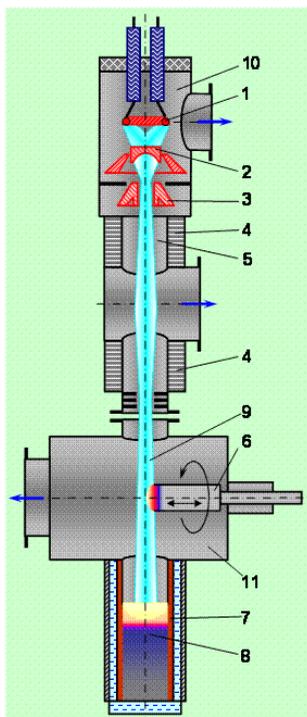
Защита зеркал от напыления осуществляется лавсановой пленкой толщиной 20–100 мкм. Влияние на качество изображения она практически не оказывает, обеспечивая наблюдение в условиях интенсивного напыления продуктами испарения. В этом случае пленку необходимо протаскивать перед зеркалом по мере ухудшения видимости места сварки. Узел защиты смонтирован на отдельном фланце и извлекается из колонны без её разбора. Защита от рентгеновского излучения обеспечивается наличием свинцовых стекол в ветвях осветителя и наблюдения.

Линза 13 фокусирует электронный луч. Обмотка фокусирующей линзы находится на каркасе, состоящем из двух магнитомягких дисков и немагнитной вставки, спаянных магнитомягким припоем. Внутренняя поверхность каркаса под обмоткой изолирована лаком. Наружная часть магнитопровода выполняет функцию биологической защиты от рентгеновского излучения. Внутренняя поверхность линзы защищена от паров и брызг обрабатываемого материала экраном.

Отклоняющая система 14 перемещает электронный луч по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Отклоняющая система состоит из двух катушек расположенных одна под другой. Фланец, на котором закреплены катушки, может вращаться на 90 градусов вокруг своей оси. Это вращение осуществляется снаружи блока с помощью зубчатой передачи и позволяет изменить направление отклонения электронного пучка, относительно координатного стола. Отклоняющая система защищена экраном от воздействия теплового излучения и продуктов испарения, сопутствующих сварке. Экран состоит из двух дисков, закрепленных на фланце.

Электронные пушки с катодом косвенного подогрева применяются для сварки деталей больших и средних толщин, плавки и рафинирования различных материалов. На рисунке 6.16 показана схематично такая пушка. Аксиальная пушка образует сильно сфокусированный электронный луч 9. В ней имеется два катода. Основной катод 2 выполненный в виде массивной вогнутой снизу вольфрамовой пластины. Он разогревается до 2300–2500 К электронной бомбардировкой от вспомогательного катода 1, который выполнен в виде нагретой током вольфрамовой спирали.

Между катодами 1 и 2 прикладывается напряжение 3,5–5,0 кВ. Вспомогательный катод 1 имеет отрицательный потенциал относительно основного катода 2, так что основной катод является анодом для вспомогательного катода. Анод 3 имеет специальную форму для создания в пространстве между ним и катодом 2 такого электрического поля, которое сфокусировало бы электронный пучок 9 так, чтобы он практически весь проходил через отверстие анода 3.



**Рис. 6.16. Конструкция плавильной аксиальной пушки**

Пройдя через анод 3, электронный луч 9 попадает в лучепровод 5, соединяющий катодную камеру 10 с плавильной камерой 11 установки, в которой находится переплавляемый электрод 6. Он может перемещаться горизонтально: его можно вводить под пучок электронов или выводить из-под него. Часть электронного луча 9 проходит мимо электрода заготовки 6 и попадает на поверхность ванны жидкого металла 8, расположенной в кристаллизаторе 7 в нижней части плавильной камеры 11.

Лучепровод 5 должен защищать катодный узел 10 от прорыва в него газов из плавильной камеры 11. С этой целью лучепровод 5 снабжен откачивающим насосом, кроме того, имеются насосы, откачивающие газы и пары из катодной 10 и плавильной камеры 11. В лучепроводе производится дополнительная магнитная фокусировка с помощью магнитных линз 4, поскольку, на своем пути через лучепровод электронный пучок расширяется. ЭЛУ с аксиальными пушками работают при ускоряющем напряжении 30–40 кВ.

Плавильные ЭЛУ применяются, главным образом, для переплавки стали, молибдена, ниобия и других тугоплавких и химически активных металлов. Их мощность составляет от 50 до 2000 кВт. ЭЛУ для сварки выпускаются с острофокусированным лучом и работают при ускоряющем напряжении 70–100 кВ.

Недостатком конструкции аксиальных пушек является сложность проведения электронного луча через длинный и узкий лучевод, а также ограниченный срок службы термокатода (до 200 ч). Кроме того, к недостаткам относятся сложность конструкции, эксплуатации и наладки, высокий уровень ускоряющего напряжения (до 30 кВ), что повышает уровень рентгеновского излучения; необходимость в системе развертки пучка для обеспечения равномерности нагрева металла.

Установки с аксиальными пушками бывают с одной или несколькими пушками и вертикальной или горизонтальной подачей переплавляемой заготовки, аналогично плазменно-дуговым печам.

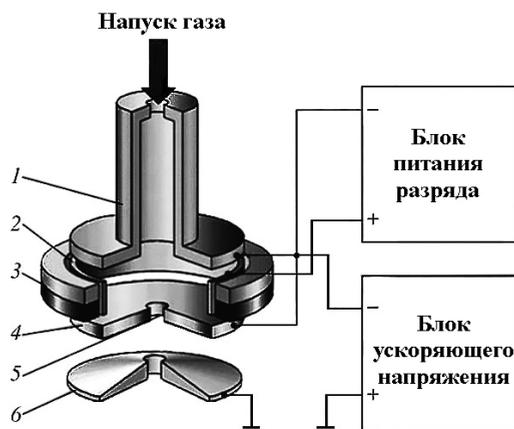
#### ***6.2.4. Установки с плазменным катодом***

Для устранения отмеченных недостатков создаются аксиальные пушки, менее чувствительные к изменению остаточного давления. Это достигается заменой термокатода пушки «холодным» плазменным катодом, работающим при тлеющем разряде [7, 8].

Одним из наиболее эффективных электронных эмиттеров является плазма разряда с полым катодом, эмиссионные и ионизационные процессы в котором инициируется дополнительный отражательный разряд. В такой комбинации разрядов обеспечиваются требуемые характеристики горения разряда с полым катодом, а также относительно просто реализуется необходимое условие работы плазменного эмиттера, а также возможность автоматического повторного иницирования, при случайном погасании разряда с полым катодом.

Электродная система отражательного разряда с полым катодом содержит три изолированных «холодных» электрода (рис. 6.17а): полый катод, анод и эмиттерный катод, в большинстве случаев имеющий потенциал полого катода. В разрядной камере создается магнитное поле, катоды являются элементами магнитной цепи. В эмиттерном катоде имеется эмиссионный канал, в котором при наличии внешнего электрического поля локализуется плазменная поверхность. Выходящие из плазмы электроны попадают в высоковольтное электрическое поле и ускоряются в нем.

Пушка имеет разрядную камеру, ограниченную холодным катодом и рамочным анодом. Через газовый канал в камеру подается плазмообразующий газ (аргон, гелий, водород). Плазма создается в разрядной камере с помощью тлеющего разряда, при напряжении 100–200 В. Стенки камеры разогреваются до 700–900°C. Под действием ускоряющего напряжения, составляющего 20–50 кВ, происходит извлечение электронов из плазмы через отверстие в аноде и их ускорение в электрическом поле между анодом и ускоряющим электродом. Созданный таким образом электронный луч затем фокусируется с помощью магнитных линз и направляется на переплавляемое изделие (металл).



а



б

**Рис. 6.17. Схема (а) и внешний вид (б) пушки с плазменным катодом:**

1 – полый катод; 2 – анод; 3 – постоянный магнит; 4 – эмиттерный катод;  
5 – эмиссионный канал; 6 – ускоряющий электрод (основной анод)

В этих пушках катод нагревается до  $1700\text{--}2200^\circ\text{C}$ , его изготавливают из тантала или молибдена. Плазмообразующим газом служит водород или гелий, расход которого составляет до  $0,5$  л/мин. Мощность пушек серии ВТР и их характеристики приведены в табл. 6.3. Для данных пушек характерна высокая стабильность работы, даже при бурном газовыделении из расплава, так как остаточное давление в пушке во время работы составляет  $\sim 13$  Па, следовательно, оно всегда выше, чем давление в плавильной камере печи, и не зависит от него, пока последнее не превысит  $7\text{--}8$  Па. В таблице 6.4 даны сравнительные характеристики электронно-лучевых пушек, выпускаемых ВЭИ.

Таблица 6.3

**Характеристики плазменных пушек серии ВТР,  
разработки ВЭИ**

Мощность, кВт	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток Пучка, А	Диаметр пучка на мишени, мм	Диапазон Рабочих давлений в рабочей камере, Па	Рабочие газы	Технологические применения
1–10	10–40	0,1–1,0	0,5–4,0	$10-10^{-2}$	воздух, кислород, аргон, гелий	Сварка тонкостенных деталей, пайка, поверхностная термообработка, аддитивное производство
30–100	25–30	1–4	5–8	$10-10^{-3}$	водород, кислород,	Сварка прессованных материалов, напыление покрытий, выращивание монокристаллов
100–450	30	3,3–15,0	8–20	$5-10^{-2}$	водород с добавками кислорода	Плавка и рафинирование тугоплавких и активных металлов и сплавов
600	40	15	15–20	$5-10^{-2}$	То же	То же

Таблица 6.4

**Сравнение электронных пушек разного вида**

Параметры	Традиционная пушка с термокатодом	Высоковольтная пушка ВТР	Газонаполненная пушка с термокатодом
Мощность, кВт	600	200	1000
Ресурс	20	>200	>200
Давление, мм рт.ст.	$10^{-5}$	$10^{-1}$	$10^{-5}$
Опасность техногенной катастрофы	низкая	высокая	низкая
КПД, %	95	70	95
Экологическая безопасность	Рентгеновское излучение	Рентгеновское излучение	Повышенный уровень безопасности
Расход воды, л/час	1000	2000	1000
Используемые газы и их расход	нет	H <sub>2</sub> -500 SSCM O <sub>2</sub> -50 SSCM	H <sub>2</sub> , He, Ar, N <sub>2</sub> 50 SSCM
Эффективность, А/Вт	100–200	500–1000	75–100
Механизм генерации электронов	Термоэлектронная эмиссия	Вторичная ион-электронная эмиссия	Термоэлектронная эмиссия
Качество продукции	Высокое	Требуется переплав	Высокое

### 6.2.5. Установки с магнетронными пушками

Новым направлением в электронно-лучевом нагреве является применение магнетронных пушек, в которых пучок электронов формируется как в однородном, так и неоднородном магнитных полях.

Возможность применения как радиальных, так и аксиальных и даже кольцевых катодов с большой рабочей поверхностью позволяет получать высокую проводимость магнетронных пушек (до 20 мкА/В). Это дает возможность создания мощных цилиндрических или трубчатых электронных пушек. Они могут работать с однородным (рис. 6.18а) или неоднородным (рис. 6.18б) магнитными полями.

В этих пушках наложение магнитного поля на поток электронов приводит к их движению по винтовой траектории с переменным шагом, зависящим от разброса кинетической энергии. Подбором напряженностей магнитного и электрического полей можно установить радиус закрутки электронов, исключая попадание их на анод.

Таким образом, при той же мощности в магнетронной пушки можно снизить ускоряющее напряжение. Магнетронные пушки менее чувствительны к точности юстировки электродов и установки катода. Даже при перекосах и эксцентриситетах электродов электроны следуют за линиями индукции магнитного поля.

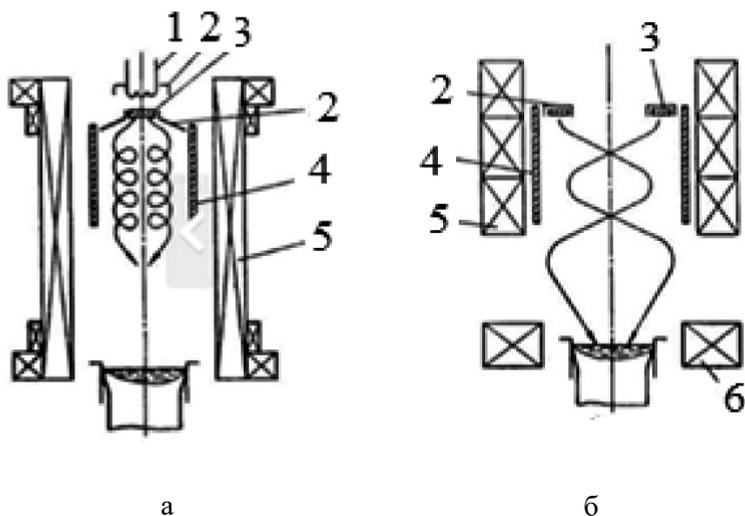


Рис. 6.18. Схемы магнетронных пушек с однородным (а) и неоднородным (б) магнитными полями

### 6.3. Примеры электронно-лучевых печей

#### 6.3.1. Установки для электронно-лучевой сварки, резки, перфорации и термообработки

Схемы типовых ЭЛУ, применяемых для сварки, пайки, термообработки, перфорации и резки, приведены на рис. 6.19. Независимо от назначения установки в ее состав входят: электронная пушка 1, вакуумная камера 2, манипулятор 3, оснастка для установки изделия 4, система вакуумной откачки 5, источник электропитания 6, и система управления 7.

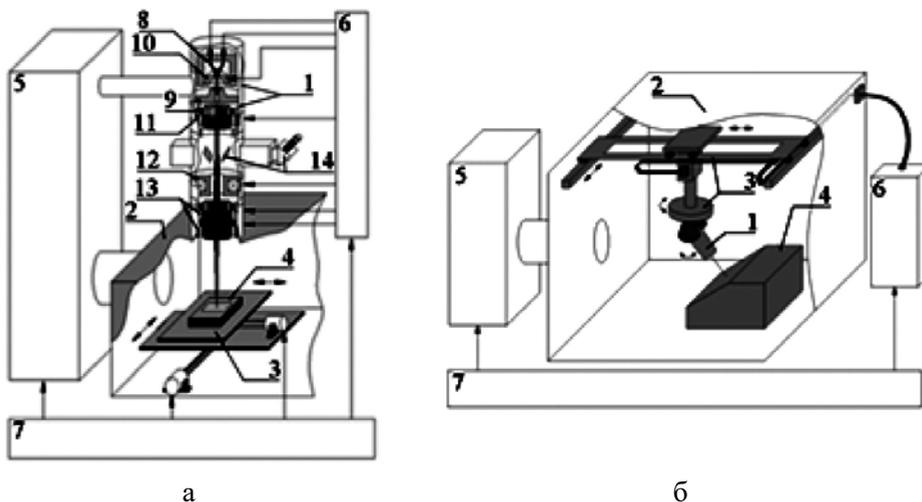


Рис. 6.19. Схемы типовых технологических ЭЛУ

В зависимости от массы, габаритов изделия, и режимов его обработки, выбирается конструктивная схема установки. Для малогабаритных изделий предпочтительна схема с неподвижной электронной пушкой и перемещаемым изделием (рис. 6.19а). И наоборот, массивные изделия обычно устанавливаются неподвижно, а пушка перемещается с помощью манипулятора внутри вакуумной камеры (рис. 6.19б).

Электронная пушка является основным технологическим «инструментом» сварочной установки, определяющим энергетические и геометрические характеристики теплового источника, возникающего в изделии при воздействии пучка электронов, и соответственно, форму сварного шва. Как правило, в установках для сварки малогабаритных изделий предъявляются повышенные требования к точности позиционирования электронного пучка, его минимальным размерам и форме. По этой причине в установках такого класса электронный пучок, эмитируемый катодом 8, ускоряемый анодом 9 и фокусируемый управляющим электродом

10, нуждается в дополнительной юстировке относительно оси пушки. Для юстировки применяются механические и магнитные юстирующие системы 11. Линзы 12 и отклоняющие системы 13 обеспечивают регулирование положения фокальной плоскости и перемещение луча по плоскости изделия. Типичные значения максимальных углов отклонения луча –  $5-7^\circ$ , встречаются установки с максимальным отклонением луча до  $35^\circ$ . Поскольку электронная пушка установлена неподвижно, на ней можно разместить дополнительное оборудование – оптические системы для наблюдения за процессом 14. Для отклонения электронного пучка от оси симметрии пушки применяются отклоняющие системы 13. На вакуумной камере устанавливаются иллюминаторы 15 из свинцового стекла ТФ-5, обеспечивающего защиту персонала от рентгеновского излучения.

В сварочных установках диапазон давлений в рабочей камере составляет от  $10^{-1}$  до  $10^{-5}$  Па, что на несколько порядков меньше, чем в плавильных печах. Необходимая быстрота действия насосов при таких давлениях может составлять от сотен л/с (камеры объемом до  $0,2 \text{ м}^3$ ) до нескольких десятков тысяч л/с (камеры объемом более  $10 \text{ м}^3$ ). Диапазон ускоряющих напряжений, применяемых в сварочных установках, составляет от 20 до 200 кВ.

Основным применением пушек с плазменным эмиттером является электронно-лучевая сварка. Уникальное сочетание пространственных и энергетических параметров электронного пучка, их высокая стабильность и повторяемость позволяют обеспечить качественные сварные соединения.

На рисунке 6.20 представлены шлифы проплавления в нержавеющей стали 12X18Н10Т (а) и титане ВТ14 (б) электронным пучком с энергией 120 кэВ при давлении в вакуумной камере  $10^{-4}$  Торр. Проплавление получено при мощности электронного пучка 12 кВт для нержавеющей стали и 6 кВт для титана. Для представленных шлифов характерен узкий и глубокий профиль проплавления с параллельными стенками, что характерно для электронного пучка с малым углом сходимости.

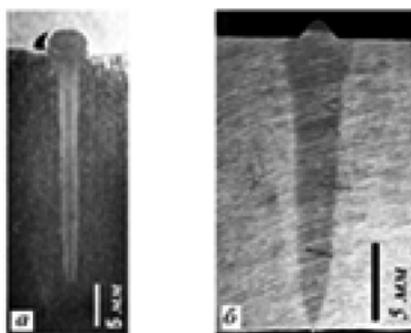


Рис. 6.20. Шлифы проплавления электронным пучком

Кроме того, решения, заложенные в конструкцию, позволяют использовать высоковольтную пушку отдельно от устройства вывода, например, для выполнения прикладных исследований и технологических операций в вакуумной камере. На рисунке 6.21 показана автоматическая линия сварки ТВЭЛов, оснащенная пушками с плазменным эмиттером на Новосибирском заводе химконцентратов (ОАО «НЗХК») герметизации тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) атомных станций. Оболочки ТВЭЛов изготавливаются в основном из сплавов циркония или алюминия. Герметичность оболочки является основным показателем, определяющим работоспособность ТВЭЛа при его эксплуатации в реакторе. Поточное производство предъявляет повышенные требования к надежности, стабильности работы оборудования технологических линий. Высокая производительность и ритм работы таких линий допускают остановки отдельного оборудования лишь на короткое время.



Рис. 6.21. Автоматическая линия сварки ТВЭЛов

### ***6.3.2. Электронно-лучевые установки для нанесения покрытий***

Особый класс технологических установок – электронно-лучевые испарители. Эти установки предназначены для нанесения проводящих, полупроводниковых и диэлектрических (керамических) покрытий методом термического электронно-лучевого испарения. Скорость нанесения покрытий может достигать 1 мкм/мин. В отличие от других способов испарения, где энергия подводится к испаряемой поверхности через стенку тигля или высокотемпературный нагревательный элемент, при электронно-лучевом испарении осуществляется прямой нагрев поверхности испаряемого материала (рис. 6.22).

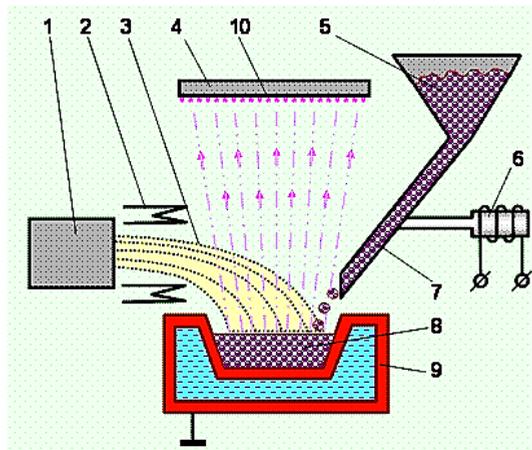


Рис. 6.22. Схема электронно-лучевой испарительной установки

Это позволяет испарять материалы 8 из водоохлаждаемого тигля 9, что особенно важно при работе с химически активными и тугоплавкими материалами. Из бункера 5 испаряемый материал по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, поступает в водоохлаждаемый тигель 9. Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 1, искривляется отклоняющей системой 2 в направлении испаряемого вещества 8. В результате воздействия луча 3 на вещество оно испаряется, частицы пара поднимаются вверх и оседают на поверхности подложки 4, образуя плотную пленку 10. Применение отклоняющего магнитного поля позволяет располагать электронную пушку 1 практически в любом удобном месте испаряемого материала 8 из тигля 9.

При электронно-лучевом испарении удастся управлять электронным лучом 3 в пространстве и во времени, регулируя тем самым интенсивность ввода энергии в испаряемое вещество 8, а, следовательно, скоростью испарения и распределения плотности потока пара.

Массовое производство установок для осаждения покрытий из газовой фазы методом электронно-лучевого испарения было начато на рубеже 60–70 годов в эпоху развития полупроводниковой микроэлектроники, оптоэлектроники и технологии нанесения защитных и просветляющих оптических покрытий. Сегодня это оборудование производят фирмы, специализирующиеся на вакуумной технике (производители насосов, затворов, измерительных приборов). Это и объясняет тот факт, что электронно-лучевые испарители производятся на базе унифицированных вакуумных постов с безмасляной откачкой. Объемы вакуумных камер в таких установках редко превышают 0,3–0,4 м<sup>3</sup>. Мощность источников электропитания варьируется в диапазоне от 1,5 до 20 кВт, а ускоряющее напряжение в пушке изменяется в пределах 2–10 кВ.

Для расчета скорости испарения часто используется известная модель с табулированными константами. Давление насыщенного пара испаряющегося материала ( $P_{н.п.}$ , Па) определяется по выражению:

$$P_{н.п.} = 1,33 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{\frac{A_v}{T_v} - \frac{B_v}{T_v}}, \quad (6.17)$$

где  $T_v$  – температура испаряющей поверхности, К,  $A_v$  и  $B_v$  – константы.

Массовая скорость испарения  $J_{г,з}$  (кг/м<sup>2</sup>/с) в приближении модели идеального газа определяется по выражению:

$$J = P_{н.п.} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_v}}, \quad (6.18)$$

где  $M$  – молярная масса материала,  $R$  – газовая постоянная (8,31 Дж/моль/К). Перенос массы металла  $\Delta m$  с единицы поверхности расплава площадью  $\Delta S$ , имеющей температуру  $T_v$  в единицу времени  $\Delta t$  можно описать выражением:

$$\Delta m = J \cdot \Delta S \cdot \Delta t. \quad (6.19)$$

Пространственное распределение плотности потока частиц с элементарной (малой) поверхности источника испаряющихся частиц, достаточно хорошо описывается косинусоидальным законом. В случае, если источник вещества точечный и имеет плотность потока на поверхности, равную  $J_0$  (кг/м<sup>2</sup>/с), зависимость плотности потока от телесного угла  $\alpha$  (угла между нормалью к поверхности и выбранным направлением потока частиц) будет определяться выражением:

$$J(\alpha) = J_0 \frac{1}{4\pi} \cos \alpha. \quad (6.20)$$

При известном распределении температуры по поверхности испаряющегося материала с использованием принципа суперпозиции, можно рассчитать пространственное распределение плотности потока пара суммированием плотностей потока в каждой элементарной области пространства от действия каждого источника пара с заданной площадью и плотностью потока  $J_0$ . Такие расчеты проводятся на ЭВМ с помощью численных методов.

Использование ЭЛН для испарения различных металлов и сплавов с целью нанесения покрытий в вакууме исключительно эффективно. Возможность создания высоких концентраций мощности непосредственно на поверхности материала обеспечивает значительные скорости испарения, достижение которых другими способами затруднительно.

ЭЛН перспективен также для термообработки и покрытия ленты. Преимущество метода заключается в скорости достижения необходимой степени нагрева, отсутствии источников загрязнения, легкой управляемости и экономичности

процесса. Он применим для отжига электротехнических сталей и сплавов, которые проходят под электронным лучом рафинирующий и формирующий структуру отжиг. Для повышения производительности данных печи могут снабжаться динамическими вакуумными уплотнениями с целью непрерывного ввода и вывода обрабатываемой ленты в вакуумную рабочую камеру. В печах этого типа помимо высокотемпературного отжига можно осуществлять покрытие ленты металлами и окислами с целью создания защитных, сверхпроводящих, полупроводящих и других слоев. Эти печи были приспособлены для изготовления фольги из металлов и сплавов путем их интенсивного испарения в вакууме. Конденсат осаждается на подложке из полированной нержавеющей стальной ленты, покрытой специальным разделительным слоем для облегчения отделения фольги от подложки. Получаемая фольга выше качеством, чем обычная, получаемая прокаткой. Процесс экономически выгоден при производстве фольги толщиной до 0,25 мм.

### ***6.3.3. Плавильные, рафинировочные, литейные ЭЛУ***

Основные схемы конструктивные решения электронно-лучевых печей для плавки приведены на рис. 6.23. Принципы построения конструкций печей во многом определяются параметрами технологического процесса – объемом выплавляемых слитков, химической активностью материала, требуемым температурным режимом и интенсивностью испарения. Диапазон ускоряющих напряжений, применяемых в плавильных печах, обычно составляет от 15 до 60 кВ.

На рисунке 6.23а – д, ж, показаны печи с электростатическими электронными пушками (ЭП), а на рис. 6.23е – с магнетронной электронной пушкой, в которой электроны движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоидальным траекториям. Широко распространены электронные пушки с кольцевыми (КК) и линейными (ЛК) катодами. Но сегодня происходит вытеснение таких систем аксиальными пушками со спиральными (СК) и дисковыми (ДК) катодами (рис. 6.23д,е). Ускоряющий анод (А) имеет потенциал корпуса установки. В ряде случаев (рис. 6.23а) в качестве анода может выступать расходный (переплавляемый) электрод РЭ или охлаждаемый кристаллизатор Кр, в котором формируется переплавленный слиток Сл.

Фокусировка пучков осуществляется магнитной фокусирующей системой МФС, а его развертка по поверхности заготовки или шихты Ш – магнитной отклоняющей системой МОС. Плавка может производиться в тигле Т, гарнисажном тигле ГТ, в литейной форме Ф или на холодном поде ХП. В электронных печах может производиться переплав полупроводниковых монокристаллов М. Технологический процесс электронно-лучевой плавки (ЭЛП) осуществляется в высоком вакууме 0,1...0,01 Па, откачка объемов рабочей камеры и пушки производится вакуумной системой ВС. Наиболее широкое распространение получают переплав-

ные печи с холодным подом XII и несколькими аксиальными электронными пушками (рис. 6.23ж), в которых осуществляется рафинирование жидкого металла в промежуточных емкостях от вредных примесей и неметаллических включений и последующее формирования слитка в кристаллизаторе. В последние годы все чаще используются печи с плазменными катодами, особенно в тех случаях, когда осуществляются процессы с большими газовыделениями.

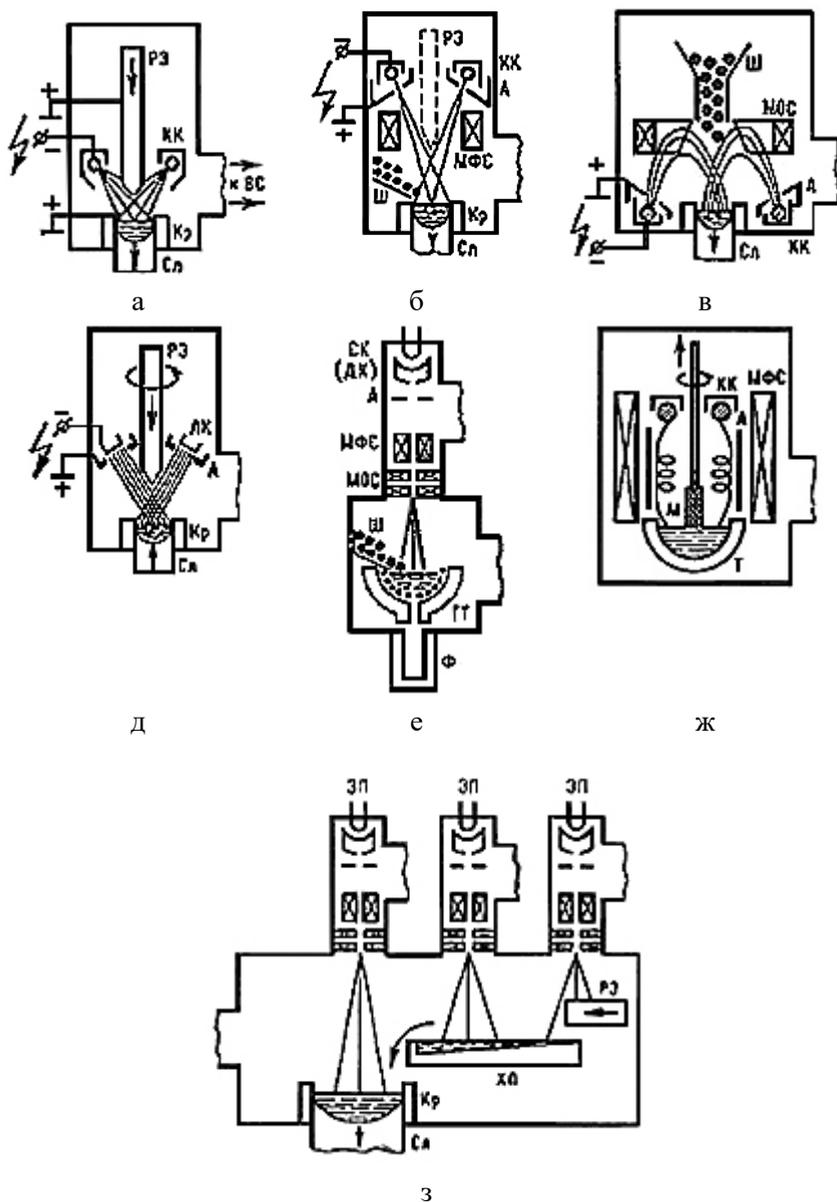


Рис. 6.23. Типовые схемы плавильных ЭЛУ

В качестве исходной шихты применяют заготовки, скрап, гранулы, стружку. Для переплавки мелкокусковой шихты в печи предусматривают специальные подающие устройства типа вращающейся трубы, которые позволяют догружать шихту во время процесса плавки без нарушения вакуума. Вакуумная система ЭЛП обеспечивает остаточное давление в рабочем пространстве  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па.

По *конструктивному признаку* ЭЛП различают с вертикальной и горизонтальной (боковой) подачей переплавляемой заготовки. По *виду переплавляемой заготовки* ЭЛП делятся на использование сплошной заготовки (электрода) или сыпучей (кусковой) шихты.

Во многих случаях можно переплавлять сыпучую шихту (измельченные кусковые отходы), при этом шихта подается в зону плавления с помощью шнекового механизма или вибрационного лотка. Применение скрапа снижает стоимость шихтовых материалов для электронно-лучевого переплава и исключает затраты на производство компактных переплавляемых заготовок. Однако при отклонении режимов плавки возможно попадание в слиток нерасплавившихся кусков шихты.

Для производства титана и титановых сплавов были разработаны электронно-лучевые плавильные печи с промежуточной емкостью (рис. 6.24). В установках такого типа плавильный объем I рабочей камеры отделен от рафинировочного II перегородкой 3. Капли жидкого металла с переплавляемой заготовки 5 стекают не в кристаллизатор б, а в промежуточную емкость 9 (холодный под – водоохлаждаемый), по которой жидкий металл протекает в рафинировочную часть рабочей камеры. В результате охлаждения пода водой на его поверхности намораживается гарнисаж 10. В рафинировочной камере II металл дополнительно перегревается электронными пушками, рафинируется и стекает в кристаллизатор б, в котором формируется слиток 7. Управление процессом кристаллизации осуществляется специальной электронной пушкой D, поддерживающей в кристаллизаторе оптимальную глубину жидкой ванны, а переплавление заготовки – электронной пушкой A.

При такой схеме процессы плавления исходного сырья и рафинирования металла, а также слив его и кристаллизации осуществляются в отдельных зонах, что позволяет поддерживать оптимальные условия для каждого из процессов. Если установку снабдить шлюзовыми устройствами для подачи заготовок, либо шихты, а так же изъятия получаемых слитков, можно осуществить нерерывный переплав. В ходе непрерывного процесса, плавление исходного сырья можно осуществлять необязательно с помощью электронного луча. Подобное устройство печи позволяет использовать шихтовые материалы различного вида: слитки, лом, стружку (подавать шнеком или по желобу), а можно и жидкий металл. Исходный металл, подаваемый в промежуточную емкость, может плавиться индукционным и электродуговым способом. Используя многоступенчатое холоднопо-

довое рафинирование (в рабочей камере несколько водоохлаждаемых подов, расположенных на разных уровнях), можно значительно повысить производительность агрегата.

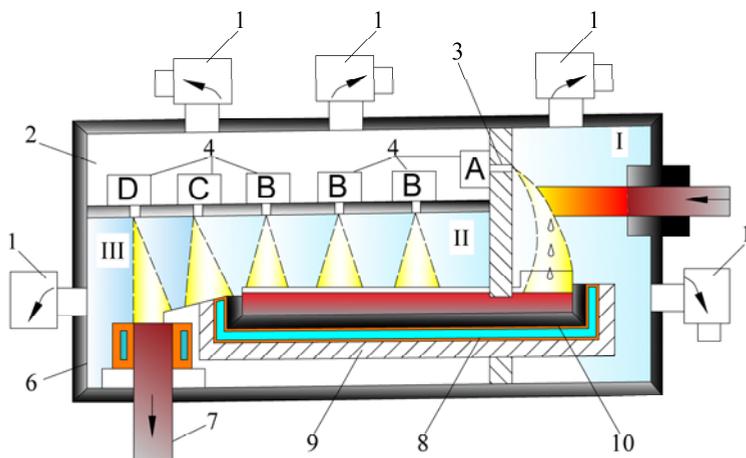


Рис. 6.24. Схема холодноподовой ЭЛУ

С использованием электронно-лучевых установок, выполненных по данной схеме, реализуются некоторые новые технологические процессы, схемы которых показаны на рис. 6.25, где изображены: 1 – электронная пушка; 2 – расплавляемая заготовка; 3 – промежуточная емкость; 4 – водоохлаждаемая изложница; 5 – направляемый слиток; 6 – водоохлаждаемый барабан; 7 – гранулы. К ним относятся: процессы получения монолитных и многослойных плоских слитков (см. рис. 6.25а), а также получение гранул из расплавляемой заготовки (см. рис. 6.25б).

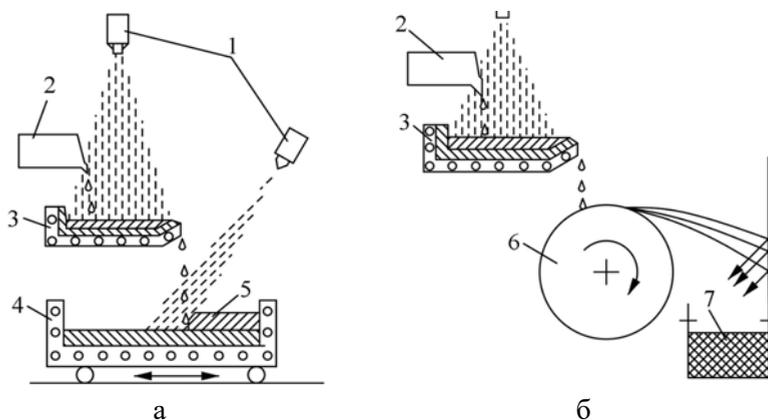


Рис. 6.25. Схемы новых разработок

При ЭЛП можно управлять процессом кристаллизации при помощи изменения скорости плавки, подводимой мощности и конфигурации зоны электронно-лучевого нагрева, а также изменением места подачи жидкого металла.

В последнее время слитки в ЭЛП формируются в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе при постепенном их вытягивании. Поверхность слитка во многом зависит от режима вытяжки. Для улучшения поверхности слитка его вытягивание производят при возвратно-поступательном движении.

Литейные ЭЛП предназначены в основном для фасонного литья тугоплавких химически активных металлов. Однако эти установки могут быть использованы и для получения обычных слитков тугоплавких металлов литьем в изложницу. Металл загружается в водоохлаждаемый тигель с удобным для электронного нагрева донным сливным отверстием, под которым располагается форма. Для увеличения объема ванны жидкого металла в электронных гарнисажных печах применяется электромагнитное перемешивание расплавленного металла с помощью соленоида. Проплавление пробки из перерабатываемого металла в донном сливном отверстии производится специальной аксиальной пушкой. Опыт показывает, что для получения отливки из тугоплавкого металла массой 100 кг требуется мощность 1000 кВт. Поэтому для получения крупных отливок целесообразно применение нескольких пушек, работающих одновременно. Основным недостатком – небольшой КПД.

#### ***6.3.4. Реализация аддитивных технологий наплавки***

В настоящее время наблюдается повсеместный интерес к разработке и внедрению в производство технологий трехмерной печати, что во многом обусловлено возможностью производства изделий сложной формы с помощью выращивания последнего при подаче присадочной проволоки под электронный пучок и формированию элементов конструкции, не осложненного необходимостью корректировки технологического процесса для каждой детали, и экономичностью расходования материала. На рисунке 6.26 показано схемное решение установки электронно-лучевого нагрева, в которой реализуется данный подход.

Изменение местоположения точки наплавления в данной установке осуществляется двумя механическими системами: трехкоординатной системой перемещения электронного источника с возможностью его поворота вокруг горизонтальной оси и системой поворота и вращения изготавливаемой детали. Наличие двух систем манипуляции электронным источником и печатаемым изделием в совокупности с необходимостью размещения источника наплавляемой проволоки внутри вакуумной камеры приводит к существенному ограничению рабочей области вакуумной камеры.



Рис. 6.26. Схема процесса электронно-лучевого аддитивного формообразования с подачей присадочной проволоки

#### 6.4. Электрооборудование и системы управления ЭЛУ

Основным элементом энергетического комплекса электронно-лучевой установки является технологическая электронная пушка. Первая линза пушки Л1 является электростатической (рис. 6.27а), и обеспечивает ускорение электронов до энергий 20–100 кЭв с их первичной фокусировкой, а вторая, магнитная линза Л2, предназначена для проецирования наименьшего сечения электронного пучка, формируемого первой линзой, на изделие И. Ток электронного пучка, а значит, и величина мощности источника нагрева может регулироваться различными способами: изменением температуры катода  $T_k$  за счет тока накала  $I_n$ , потенциала анода (ускоряющего напряжения  $U_y$ ), и потенциала управляющего электрода (напряжения смещения  $U_c$ ). Первые два способа не лишены недостатков. Например, процесс регулирования температуры катода характеризуется высокой инерционностью, в результате чего импульсное регулирование тока таким способом невозможно. При изменении ускоряющего напряжения источника питания, смещается плоскость фокусировки, что приводит к необходимости непрерывного регулирования тока магнитной линзы. Кроме того, такой способ регулирования технически сложен. Поэтому на практике обычно используется третий способ – регулирование потенциала управляющего электрода, или напряжения источника питания смещения. При изменении потенциала управляющего электрода изменяется конфигурация поля в прикатодной области, что влияет одновременно на размеры «пятна эмиссии» катода и на положение кроссовера. Положение плоскости фокусировки при таком регулировании нарушается в меньшей степени, чем при изменении потенциала анода. Такой способ является и наименее энергетически затратным – управляющий электрод работает только в режиме ограничения тока пучка, и источник, фактически нагружен, только на внутреннее сопротивление.

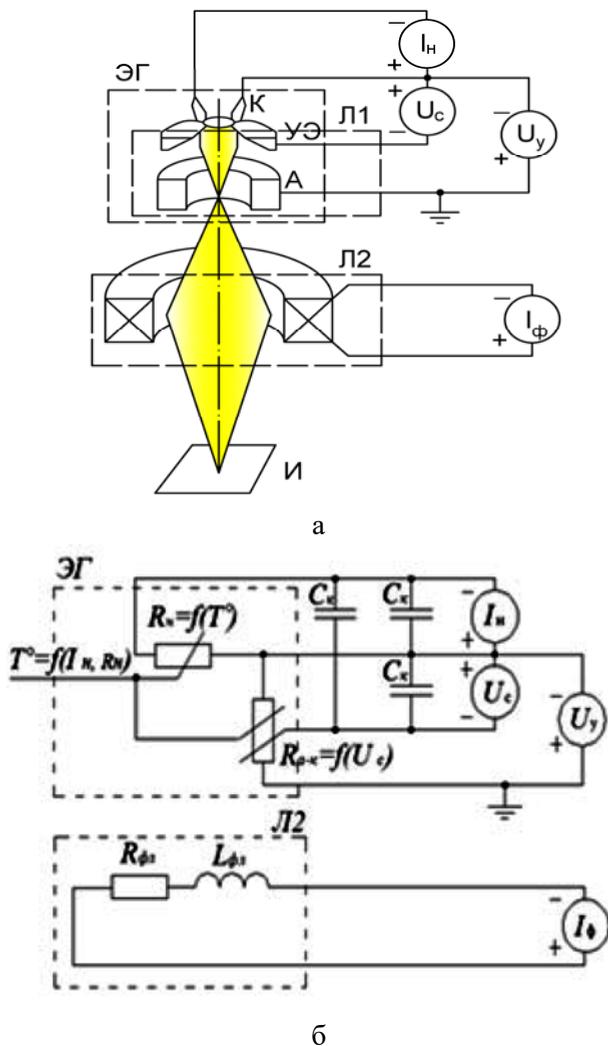


Рис.6.27. Схема трехэлектродной электронной пушки (а) и её схема замещения (б)

Таким образом, в процессе сварки традиционно изменяют только два параметра – напряжение смещения  $U_c$ , и ток магнитной фокусирующей линзы  $I_\Phi$ , что обеспечивает независимое регулирование мощности и плотности мощности источника нагрева. Остальные параметры – температуру катода и ускоряющее напряжение, стабилизируют. Требования к стабильности продиктованы влиянием хроматических aberrаций на размеры пятна нагрева.

Для работы двухлинзового генератора электронного пучка необходимы четыре регулируемых стабилизированных источника электропитания (рис. 6.27б). Источники питания накала катода и фокусирующей линзы используются для пи-

тания нагрузок с низким сопротивлением, обладающих высокой инерционностью (на данном рисунке показаны в виде активных сопротивлений  $R_n$ ,  $R_{фл}$  и индуктивности  $L_{фл}$ ). Источники ускоряющего напряжения и смещения работают на нагрузку с высоким сопротивлением. Ускоряющий промежуток пушки на рис. 6.27б показан в виде нелинейного элемента с сопротивлением  $R_{а-к}$ , зависящим от температуры катода пушки, ускоряющего напряжения и напряжения смещения. Инерционность цепей «анод-катод» и «катод-управляющий электрод» мала, и зависит только от емкости высоковольтных кабелей. Динамические характеристики процесса электронно-лучевой сварки будут определяться выходными емкостями соответствующих источников питания и инерционностью цепей управления.

Вне зависимости от типа используемой электронно-лучевой пушки важнейшую роль для обеспечения управляемости и воспроизводимости процесса играет высоковольтный источник питания пушки. Основным требованием для высоковольтного источника питания является обеспечение стабильности ускоряющего напряжения между анодом и катодом пушки при регулировании нагрузки. Ток пучка в трехэлектродных пушках может регулироваться от нулевого значения, когда пушка «заперта», до максимального, определяемого первенсом пушки. При этом типичны требования к стабильности ускоряющего напряжения в диапазоне (0,01–0,1)%, что предъявляет дополнительные требования к схемотехнике стабилизаторов ускоряющего напряжения.

С другой стороны, источник питания ускоряющего напряжения должен обеспечивать ограничение мощности вплоть до полного прерывания тока нагрузки при высоковольтном пробое. Пробои возникают чаще всего вследствие ионизации паров металла, остаточных газов и паров вакуумного масла, и характеризуются резким снижением сопротивления цепи анод-катод практически до нулевого значения за время порядка 10 нс – 1 мкс. На рисунке 6.28 изображены: К – катод; А – анод; И – изделие; ЭФ – формирующий электрод; УЭ – управляющий электрод.

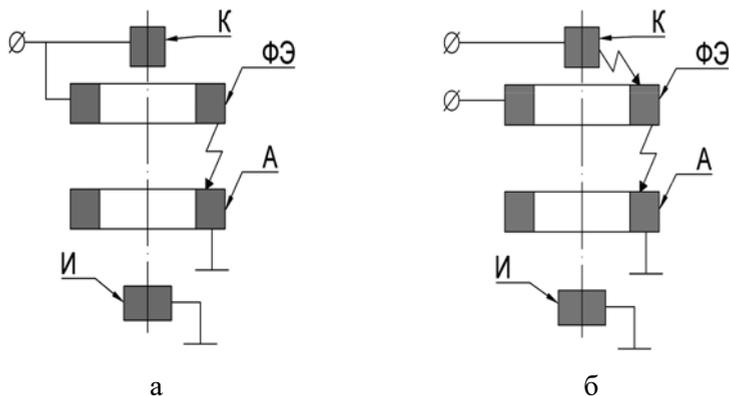


Рис. 6.28. Схемы развития пробоев в диодной (а) и триодной (б) пушках

В диодной пушке (рис. 6.28а) катод и формирующий электрод электрически соединены, поэтому в процессе пробоя ускоряющее напряжение падает, электронный пучок прерывается, а источник ускоряющего напряжения переходит в режим короткого замыкания. В триодной системе (рис. 6.28б) процесс происходит в 2 стадии. Сначала потенциал управляющего электрода растет практически до потенциала анода (пушка кратковременно переходит в «режим усиления тока»), ток пучка принимает максимальное значение и происходит прожог изделия. Затем происходит пробой между катодом и управляющим электродом, и далее все будет происходить как в диодной системе – пучок прервется, а источник ускоряющего напряжения будет работать в режиме короткого замыкания. Следует иметь в виду, что пробои между управляющим электродом и корпусом установки часто происходят по поверхности изолятора пушки вследствие наличия в этой области паров влаги, загрязнений и паров металла.

Описанные требования к источникам питания, продиктованные параметрами нагрузки, вынуждают разработчиков систем электропитания использовать нестандартные технические решения, которые будут раскрыты далее.

Традиционно для получения высокого напряжения (до 100 кВ) применялись источники с однофазными и трехфазными трансформаторами, работающими на частоте 50 Гц. Как показала практика, требования к стабильности высокого напряжения оказались выше, чем могут обеспечить описанные источники без добавления систем стабилизации. Стабилизацию напряжения необходимо проводить по двум основным дестабилизирующим факторам: нестабильности питающего напряжения и нестабильности нагрузки. Для этих целей первоначально применялись стабилизаторы компенсационного типа, которые условно можно разделить на две группы – с регулирующим элементом в первичной цепи повышающего трансформатора, и непосредственно в цепи высокого напряжения. В качестве регулирующего элемента в первичной цепи может быть использован либо магнитный усилитель, либо тиристорное устройство. Из-за высокой инерционности такие схемы распространения не получили. Поэтому, начиная с 60-х годов, компенсационные стабилизаторы ускоряющего напряжения сварочных установок строятся с использованием регулирующих элементов, установленных в цепи нагрузки высокого напряжения, – электронных ламп. Последовательно включенные пушка и лампа образуют управляемый делитель напряжения. Безынерционное регулирование осуществляется изменением внутреннего сопротивления лампы.

В случае возникновения пробоев стабилизатор напряжения компенсационного типа увеличивает ток нагрузки, что может привести к переходу искрового разряда в дуговой. В трех электродных пушках в начальной стадии пробоя потенциал управляющего электрода повышается, что приводит к полному «отпираанию» эмиссионной системы, повышению тока пучка и повреждению изделия.

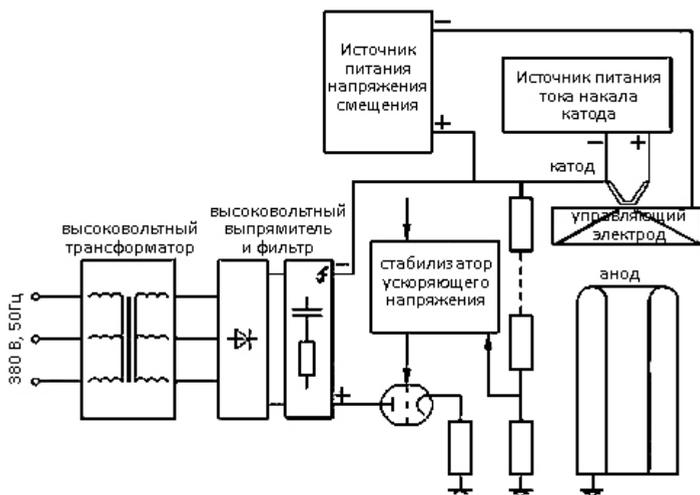
Энергия разряда емкостей источников определяется энергией  $W$ , накопленной в конденсаторах фильтра

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (6.21)$$

где  $C$  – емкость (Ф),  $U$  – напряжение (В). По опытным данным установлено, что для исключения отрицательного влияния пробоев на процесс сварки энергия, накопленная в конденсаторе, установленном параллельно нагрузке, не должно превышать 10–20 Дж. При этом условии ёмкость конденсатора фильтра оказывается недостаточной для подавления пульсаций до требуемого уровня при частоте напряжения 50 Гц. Поэтому емкость конденсатора обычно определялась из условия снижения пульсаций напряжения до требуемого уровня, а для ограничения мощности разряда использовались лампы, например, триоды или тетроды. Разработка пентодов ПП2-2/85 в СССР 1970-х годах привела к появлению целых серий электронно-лучевых комплексов для сварки и обработки материалов, например ЭЛА-60/60, ЭЛА-50/5.

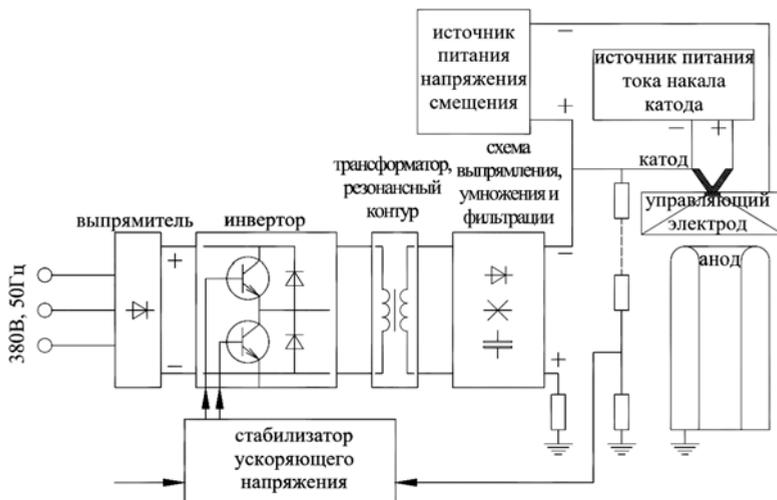
У пентода величина анодного тока очень слабо зависит от изменений анодных напряжений. Во время пробоя в пушке, когда все напряжение источника оказывается приложенным к пентоду, ток через него определяется не анодным напряжением, а напряжением на его управляющих сетках. Преимуществом использования пентода в схеме источника питания ускоряющего напряжения электронной пушки является то, что он выполняет сразу две функции – стабилизации ускоряющего напряжения по компенсационному принципу, и ограничения тока пробоя на заданном уровне, определяемым сеточным напряжением. Схема источника со стабилизатором компенсационного типа, в котором повышение напряжения осуществляется на частоте 50 Гц, приведена на рис. 6.29. Величина ускоряющего напряжения задается одновременно с переключением ступени обмотки трансформатора.

Катод пентода соединяется с корпусом установки через резистор, служащий для измерения тока луча. Такие источники отличаются простой схемы и высокой надежностью, однако, как уже было сказано выше, имеют большие выходные емкости, что снижает быстродействие регуляторов. Кроме того, в таких источниках необходимо изолировать, как отрицательный, так и положительный выводы силового выпрямителя, что усложняет конструкцию и повышает требования к изоляции. Для установки пентода в маслonaполненном баке необходимы источники питания сеточных и анодных цепей, тока накала, линзы и магниторазрядного насоса. На сегодняшний день стоимость пролетных пентодов, не выпускаемых серийно, чрезвычайно высока.



**Рис. 6.29. Функциональная схема высоковольтного источника питания с трансформатором промышленной частоты**

Развитие элементной базы силовых преобразователей и появление мощных высокочастотных транзисторов, силовых IGBT модулей, и снижение их стоимости привело к широкому распространению именно источников питания инверторного типа. Такие источники позволяют обеспечить низкий уровень пульсаций (0,5–0,05%) при небольшой выходной емкости фильтров, так как работают на повышенной частоте. Источники такого типа (рис. 6.30) выполняются по схеме с промежуточным преобразованием частоты, в них используются малогабаритные импульсные трансформаторы с ферритовыми сердечниками, работающие на частотах 10–100 кГц.



**Рис. 6.30. Функциональная схема высоковольтного источника питания инверторного типа повышенной частоты**

Регулирование тока и напряжения в таких источниках осуществляется на стороне низкого напряжения посредством изменения длительности и частоты следования импульсов управления силовым инвертором. Подобные источники часто строятся по импульсно-резонансной схеме, что позволяет снизить пульсации выходного напряжения и повысить КПД схемы. Применение схем умножения напряжения позволяет снизить габариты трансформаторно-выпрямительного блока. Благодаря малой запасенной энергии (до 1...2 Дж/кВт), существенно затруднен переход искровых разрядов в ускоряющем промежутке в дуговые.

Разработка высокочастотных импульсных источников питания является крайне сложной технической задачей, при решении которой необходимо учитывать влияние паразитных индуктивностей и емкостей элементов схемы, высокочастотные полевые и сетевые наводки. При уменьшении габаритов источников к изоляции предъявляются повышенные требования. Для защиты цепей управления от влияния высоковольтных импульсных перенапряжений часто применяют быстродействующие оптопары. Соблюдение всех этих требований усложняет конструкцию и делает длительным процесс разработки. Большинство производителей выполняют высоковольтные источники в виде необслуживаемых модулей, залитых изолирующим компаундом.

Несмотря на известные преимущества высокочастотных источников, обусловленные меньшей запасенной энергией, задача защиты от высоковольтных пробоев остается технически сложной. Разработчикам приходится сталкиваться с противоречивыми требованиями к снижению пульсаций выходного напряжения с одной стороны, и реализации быстродействующей защиты от пробоев, с другой. Такая защита, как правило, организуется по каналу управления инвертором на низкой стороне питающего напряжения. Многие современные высокочастотные источники не обеспечивают достаточно быстрого восстановления ускоряющего напряжения после пробоя, что ограничивает их применение, особенно в мощных сварочных установках.

Несмотря на ряд технических отличий, в целом, современные инверторные источники строятся по общему принципу, что продиктовано стремлением к уменьшению габаритов, удешевлению производства и легкого встраивания источников в общую систему управления установкой.

Как правило, все четыре источника, необходимые для проведения процесса сварки: источник питания ускоряющего напряжения ИПУН, источник питания накала катода ИПН, источник питания смещения ИПС и источник питания фокусирующей линзы строятся по схеме с промежуточным преобразованием частоты на базе инверторов. Отличия могут заключаться в способе регулирования выходного напряжения или тока инвертора.

Регулирование тока в источниках питания накала катода и смещения может осуществляться посредством широтно-импульсной модуляции напряжения в инверторах ИПН и ИПС. Аналогичным образом выполняется источник питания фо-

кусирующей магнитной катушки (линзы). Однако реализация этого источника питания не вызывает трудностей, поскольку он электрически не связан с высоковольтным блоком, а требуемое напряжение на фокусирующей катушке не превышает 100 В при токе до 1 А. Основной особенностью этого источника являются повышенные требования к стабильности тока.

Особый интерес представляет конструкция трансформаторно-выпрямительного блока (ТВБ) инверторного источника ИПУН. Используемая в источниках «следящая» схема защиты от пробоев, не требует высоковольтной изоляции обоих выводов выпрямителя, как это делалось в традиционной схеме с использованием пентодов. Это позволяет значительно сократить габариты источника и строить его конструкцию по принципу «этажерки» с заземленным положительным выводом на нижнем ярусе.

Обратная связь по напряжению в таких источниках осуществляется с помощью делителей напряжения ДН, а по току – с помощью шунтов Ш. Обратная связь по напряжению используется для стабилизации выходного напряжения источника питания, а обратная связь по току выполняет функции защиты источника питания от коротких замыканий. Управление инверторами осуществляется системой импульсно-фазового управления СИФУ.

Развитие элементной базы не могло не повлиять на принципы построения и функционирования источников ИПН и ИПС.

Проведенный анализ схмотехнических решений и тенденций развития источников питания ЭЛУ показывает целесообразность перехода от традиционных источников питания промышленной частоты к инверторным источникам питания, использующих промежуточную частоту в диапазоне 10–100 кГц. Высоковольтные источники питания с преобразованием частоты более технологичны и имеют существенно лучшие энергетические и массогабаритные показатели. Использование цифровых систем управления током электронного пучка и током фокусировки сигналами произвольной формы расширяет технологические возможности оборудования для электронно-лучевой сварки, в частности, позволяет шире использовать импульсные режимы сварки.

Энергетические и геометрические характеристики электронного пучка могут изменяться практически безынерционно. Например, скорость отклонения пучка в магнитном поле отклоняющей катушки будет ограничена только индуктивностью катушки и инерционностью источника питания. С этой точки зрения для решения задач управления электронный пучок является уникальным инструментом.

Перемещение изделия относительно электронного пучка обычно осуществляется с помощью электропривода. В настоящее время основным типом используемого привода является шаговый привод или сервопривод. При использовании передач типа шариковых винтовых пар точность позиционирования де-

тали относительно пучка может составлять 1 мкм и выше. Для управления приводом используются системы программного управления перемещения, использующие промышленные языки программирования (например, G-коды).

На рисунке 6.31 приведена функциональная схема установки прецизионной электронно-лучевой сварки с системой управления, на которой изображен: ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ЮС – юстирующая система; Л – линза; ОС – отклоняющая система; БПН – блок питания накала катода; БПС – блок питания смещения (управляющий потенциал); БПОС – блок питания юстирующих систем; БПЛ – блок питания линзы; БПОС – блок питания отклоняющих систем; БПД – блок питания двигателей; БОСД – блок обработки сигнала с датчиков перемещения.

Как правило, система управления строится по иерархическому принципу, и управляющей системой верхнего уровня в ней является промышленный компьютер. Такое решение позволяет устанавливать дополнительные локальные регуляторы, датчики и исполнительные устройства, и включать их в общую систему управления, без внесения существенных изменений в ее структуру.

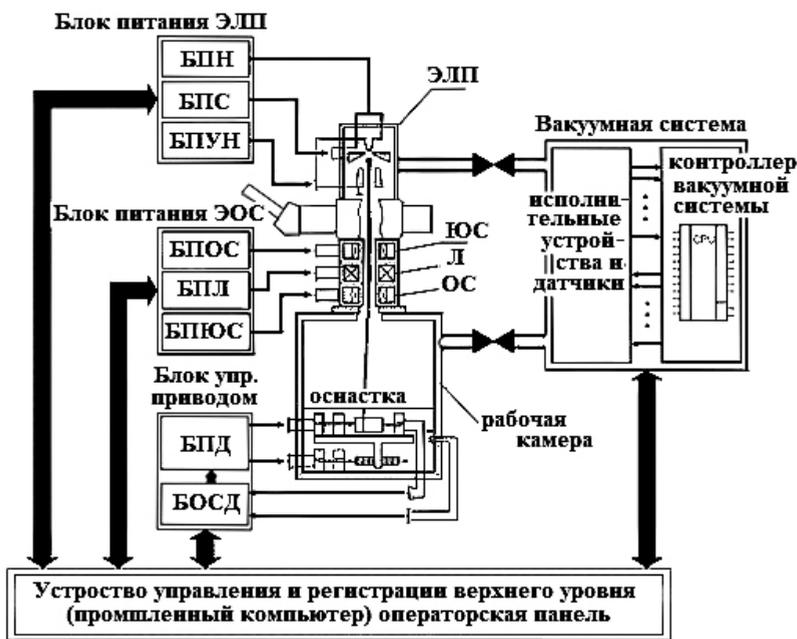


Рис. 6.31. Функциональная схема технологической ЭЛУ с системой управления

Можно выделить следующие основные каналы управления процессом электронно-лучевой обработки. Канал управления мощностью электронного пучка включает в себя регулятор тока пучка, для которого исполнительным эле-

ментом является блок питания смещения БПС, а сигналом обратной связи – ток источника питания ускоряющего напряжения. Канал управления фокусировкой и перемещением пучка включает в себя блок питания магнитной линзы БПЛ и блоки питания отклоняющих систем БПОС с системами стабилизации токов нагрузки. Канал управления перемещением изделия включает в себя блоки питания двигателей БПД и блоки обработки сигналов с датчиков перемещения (оптические датчики положения, концевые выключатели). По этим каналам осуществляется управление во время процесса сварки. Управление сваркой может осуществляться как в разомкнутом режиме – по программе, так и с использованием сигналов обратных связей – например, сигналов с коллектора обратно рассеянных электронов при наведении пучка на стык деталей, пирометров и ИК термометров для поддержания заданной температуры изделия при обработке.

Система вакуумной откачки функционирует в автоматическом режиме и при достижении рабочей величины остаточного давления в камере ( $10^{-1} \dots 10^{-3}$  Па) и в пушке ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па) работает в стационарном режиме до окончания технологического процесса.

### Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит физическая сущность электронного нагрева и особенности, необходимые условия плавки металла в электронно-лучевых печах?
2. Каково назначение и принцип действия электронной пушки?
3. Дайте классификацию электронно-лучевых установок (ЭЛУ).
4. Каково устройство и работа ЭЛУ с кольцевым катодом, их преимущества и недостатки?
5. Каково устройство и работа ЭЛУ с радиальной пушкой, их преимущества и недостатки?
6. ЭЛУ с аксиальной пушкой. Расскажите о конструктивных особенностях, преимуществах и недостатках.
7. Каковы конструктивные особенности и принцип действия ЭЛУ с плазменным катодом?
8. Каковы особенности работы ЭЛУ с магнетронной пушкой?
9. Что такое переplавные ЭЛП, каково их назначение, устройство и работа?
10. Расскажите об устройстве и работе ЭЛП с холодным подом и промежуточной емкостью.
11. Что такое литейные ЭЛП, каково их назначение?
12. Каковы преимущества и недостатки плавки металла в ЭЛП, их область применения?
13. В чем особенности испарительных ЭЛП?
14. Каково назначение и принцип действия электронной пушки?

15. Какие источники электропитания используются в ЭЛУ, какие особенности у них?
16. Расскажите о структуре и особенностях систем управления электронным лучом.
17. Какова структура и особенности систем управления ЭЛУ?

### **Список рекомендуемой литературы к главе 6**

1. Введение в технологию электронно-лучевых процессов. – М.: Металлургия, 1978.
2. Заборонюк, Г.Ф. Электронная плавка металла / Г.Ф. Заборонюк, Т.И. Зеленцов, А.С. Ронжин и др. – М.: Металлургия, 1965.
3. Шиллер, З. Электронно-лучевая технология: пер. с нем. / З. Шиллер, У. Гайзиг, З.М. Панцер. – М.: Энергия, 1980.
4. Рыкалин, Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. – М.: Машиностроение, 1978.
5. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник. / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев и др. – М.: Машиностроение, 1985.
6. Чернышов, Е.А. Специальные плавильные печи. Ч. 1. Электродуговые печи: учеб. пособие / Е.А. Чернышов. – Нижний Новгород, 2014.
7. Опыт применения пушек с плазменным катодом для электронно-лучевой сварки тепловыделяющих элементов атомных станций / В.И. Васильков, А.А. Кислицкий, Н.В. Онучин и др. // Автоматическая сварка. – 2002. – № 6. – С. 38–40.
8. Бурдовицин, В.А. Форваумные плазменные источники электронов электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник и др. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2014.
9. Технология обработки материалов. Оборудование электронно-лучевых комплексов : учеб. пособие / А.В. Щербаков, Р.В. Родякина, В.В. Новокрещенов и др. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019.

## ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ (ЛАЗЕРЫ)

### 7.1. Физические основы работы лазеров

Одним из самых замечательных достижений физики второй половины двадцатого века было открытие физических явлений, послуживших основой для создания удивительного прибора оптического квантового генератора, или лазера. Лазер – это, устройство, преобразующее энергию накачки в какой-либо ее форме в энергию потока оптического излучения, являющегося когерентным, монохроматическим, сфокусированным и, локализованным вдоль одного направления в пространстве (представляет собой узконаправленный поток или луч). Для пояснения приведенных выше терминов, а также самого явления вынужденного излучения, необходимо сначала вспомнить основы атомной физики и современной световой оптики.

Слово лазер происходит от английского словосочетания Light amplification by stimulated emission of radiation, которое переводится – усиление света с помощью стимулированного излучения [1].

Какова же природа света? Этот вопрос волновал человечество с древнейших времен. Еще древние греки разработали две противоречащих друг другу теории света: по мнению Эмпедокла, глаз проецирует луч, который «чувствует» объект; Пифагор, в свою очередь, предположил, что свет состоит из частиц, испускаемых объектом. Эмпедокл впервые высказал мысль о том, что скорость света не бесконечная величина. Примерно полтора тысячелетия позже, в 1665 г., Исаак Ньютон выдвинул свою теорию, которая тоже утверждает, что свет состоит из частиц, или «корпускул». Несмотря на то, что корпускулярная теория света объясняла многие явления природы, она лишь частично могла объяснить многие другие. Через несколько лет после появления корпускулярной теории света, голландский астроном, математик и физик Христиан Гюйгенс предложил новый способ видения вещей. Он наблюдал за формой и поведением волн воды, а в результате разработал свою волновую теорию света и законов преломления. Эти работы стали первоосновой волновой теории света, а сам подход был развит, и обоснован теоретически и экспериментально шотландским физиком Джеймсом К. Максвеллом и немецким физиком Генрихом Р. Герцем. С тех пор мы знаем, что свет представляет собой электромагнитную волну, также, как радиоволны и рентгеновские лучи. Сегодня существует понятие оптического излучения – это – такое электромагнитное излучение, длины волн которого лежат в диапазоне с

приблизительными границами от единиц нанометров до десятых долей миллиметра. Таким образом, помимо видимого света, понятие «оптическое излучение» включает в себя ультрафиолетовый и инфракрасный спектры излучения [2, 3].

К середине прошлого века был хорошо освоен диапазон от постоянного тока (0 Гц) до частот порядка нескольких гигагерц ( $10^{12}$  Гц).

История об Архимеде, якобы уничтожившем более двух тысячелетий назад вражеский флот с помощью зеркал-концентраторов солнечного излучения, может считаться первой попыткой обосновать возможность использования световой энергии в качестве средства поражения.

С самого начала своей истории человечество знало только один источник света – тепловой. Чем сильнее нагрето тело и чем больше его масса, тем больше света оно излучает. Однако по мере накопления фундаментальных научных знаний о физических процессах генерации света становилось все яснее, что при увеличении толщины раскаленного тела растет и поглощение в его массе. Попытка повысить таким образом излучаемую мощность приводит к тому, что растущие потери сводят на нет наши усилия. Поднимать температуру можно тоже только до определенного предела, зависящего от тепловой прочности материала и величины подводимой энергии. На пути повышения мощности излучения возникает и множество других препятствующих факторов, приводящих к необходимости решать все более сложные проблемы.

Альберт Эйнштейн ввел понятие «световой квант». Эйнштейн также высказал теорию о том, что свет существует только в виде квантов [4, 5]. Он использовал это определение для объяснения фотоэлектрического эффекта – явления испускания электронов стальной пластиной при ее облучении светом. Чтобы вызвать выброс электрона из стальной пластины фотон должен обладать определенной энергией

$$A = h \cdot \nu_{\min}, \quad (7.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка, Дж·с,  $\nu_{\min}$  – минимальная частота излучения ниже которой энергии фотона уже недостаточно для того, чтобы «выбить» электрон из металла. Частота  $\nu_{\min}$  называется «красной границей фотоэффекта».

Согласно данной теории (вынужденное излучение) индуцированное излучение – генерация нового фотона при переходе квантовой системы (атома, молекулы, ядра и т.д.) из возбужденного в стабильное состояние (меньший энергетический уровень) под воздействием индуцирующего фотона, энергия которого была равна разности энергий уровней. Созданный фотон имеет ту же энергию, импульс, фазу и поляризацию, что и индуцирующий фотон (который при этом не поглощается). Оба фотона являются когерентными. Когерентность нескольких колебательных или волновых процессов (в физике) – согласованность (скоррелированность) этих процессов во времени, проявляющаяся при их сложении.

В 1938 г. советский физик В.А. Фабрикант предложил метод прямого экспериментального доказательства существования вынужденного излучения и при этом был первым, кто обратил внимание на принципиальную возможность создания среды, не ослабляющей, а усиливающей проходящее через неё излучение. В 1951 г. была подана заявка на изобретение нового метода усиления света. Было показано, что прохождение света сквозь среду с инверсной заселённостью приводит к экспоненциальному возрастанию его интенсивности. Принцип усиления был распространён на ультрафиолетовый, инфракрасный и радиодиапазон. Авторское свидетельство по этой заявке было выдано с большим опозданием – только в 1959 г., а в 1964 г. – диплом об открытии № 12 с приоритетом от 1951 г. «На способ усиления электромагнитного излучения (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), основанный на использовании явления индуцированного испускания». Таким образом, впервые в мире была дана чёткая формулировка квантового способа усиления электромагнитных волн в средах, находящихся в неравновесном состоянии, изложена теория квантового усиления, сформулирован закон усиления в средах с отрицательным коэффициентом усиления.

В 1952 г. ученые трех стран одновременно (в Советском Союзе – Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, в США – Ч. Таунс, Дж. Гордон и Х. Цайгер, в Канаде – Дж. Вебер) независимо друг от друга предложили принцип генерации и усиления сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний, основанный на использовании индуцированного излучения.

1954 год: первый микроволновой генератор – мазер на аммиаке. Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм (длина волны, излучаемой при переходе аммиака с возбуждённого колебательного уровня на основной). Для усиления электромагнитного излучения оптического диапазона необходимо было создать объёмный резонатор, размеры которого были бы порядка микрона [3, 5].

В 1955–1957 гг. появились работы Н.Г. Басова, Б.М. Вула, Ю.М. Полова и А.М. Прохорова в СССР, а также американских ученых Ч. Таунса и А. Шавлова, в которых были приведены научные обоснования для создания квантовых генераторов оптического диапазона. В декабре 1960 г. Т. Мейман сумел построить первый успешно работающий лазер с рубиновым стержнем в качестве активного вещества. Этот лазер работал в импульсном режиме и излучал энергию в красной области спектра.

В 1960 г. под руководством американского ученого А. Джавана был создан газовый лазер. Он использовал в качестве активной среды смесь газов гелия и неона. Лазер работал в непрерывном режиме в инфракрасном диапазоне, затем был модифицирован для излучения видимого красного света с длиной волны 632,8 нм.

В 1962 г. практически одновременно в СССР и в США был создан лазер, у которого в качестве активного вещества применили полупроводниковый элемент.

Разнообразие имеющихся на сегодняшний день лазеров определяется тем, что в качестве активных сред для них используются все формы состояния вещества – газы, жидкости, твердые тела, плазма, причем с использованием каждой новой формы вещества в качестве активной среды связаны определенные этапы развития квантовой электроники. Именно наличие большого количества принципиально отличных сред и большого разнообразия систем энергетических уровней в каждой из них предопределило бурное начало развития квантовой электроники. Поэтому поиск различных активных сред можно рассматривать как метод квантовой электроники на ранней стадии ее развития. Работа в этом направлении не потеряла своей актуальности и сегодня.

Кроме разработки лазерных систем, использующих принципиально новые активные среды и системы уровней в них, развитие квантовой электроники с самого начала шло и по пути повышения качества (полезности) излучения уже существующих. Для многочисленных применений требовалось увеличение мощности излучения, уменьшение угловой расходимости лазерного луча и длительности лазерного импульса, повышение стабильности частоты и улучшение ряда других характеристик, определяющих в целом качество лазерной энергии. Изучение различных конкретных устройств, в которых осуществляется преобразование энергии с повышением ее качества показывает, что общим свойством таких устройств является наличие в них нелинейности, которая связана с насыщением усиления, проявляющимся в уменьшении инверсной населенности с ростом интенсивности излучения, и рядом других причин.

Именно использование различных нелинейных явлений позволило квантовой электронике добиться успехов в повышении качества лазерной энергии, способствовавших ее бурному развитию. Громадную роль при этом сыграл накопленный радиотехникой опыт. Однако в использовании и познании нелинейных явлений квантовая электроника пошла существенно дальше. Радиотехника имеет дело главным образом с нелинейной теорией колебаний. Для развития квантовой электроники потребовалось создание нелинейной теории волновых явлений. Работы в этом направлении начал и долгое время возглавлял Р.В. Хохлов. Под его руководством возникли и заняли ведущие мировые позиции отечественные школы нелинейной акустики и нелинейной оптики.

Используя нелинейные явления, можно осуществлять такие процессы, которые в линейной области казались невозможными. Например, посылая на кристалл луч рубинового лазера и невидимое для глаза инфракрасное излучение от какого-либо предмета, можно получать изображение этого предмета в видимом свете.

Нелинейные процессы воздействия лазерного излучения на вещество составляют основу технологического применения лазеров, являются сущностью тех новых принципов, которые воплощаются в лазерах как орудиях труда.

В любом физическом теле, твердом, жидком или газообразном, молекулы движутся, колеблются, вращаются; то же делают и атомы. А в атомах перескакивают с орбиты на орбиту электроны, при этом они обмениваются энергией.

Связь энергии кванта света с частотой ясна из следующего выражения:

$$h\nu = hc/\lambda, \quad (7.2)$$

где  $\lambda$  – длина плоской монохроматической волны.

Считается, что фотон является одновременно и частицей, и волной, т.е. признается возможным соединением в одном объекте волновых и механических свойств, вытекающее из постулатов принципиально новой науки о микромире – волновой, или квантовой, механики.

Взаимодействие элементарных излучателей (назовем их микросистемой) и света характеризуется энергией и импульсом как микросистемы, так и кванта света. Причем эти параметры оцениваются и до, и после столкновения кванта и микросистемы. Сталкиваясь с микросистемой, квант света возбуждает атомы и молекулы, отдавая им свою энергию. Наиболее сильное (резонансное) взаимодействие происходит тогда, когда частота колебаний кванта света совпадает с одной из собственных частот колебаний электронов микросистемы. В этом случае атомы и молекулы, находясь в возбужденном состоянии, становятся вторичными излучателями квантов. При взаимодействии света и микросистемы происходит обмен энергией, при котором рождаются одни и уничтожаются другие кванты света. В соответствии с законом сохранения энергии возможны три вида взаимодействия. При первом виде взаимодействия наблюдается полное поглощение кванта света микросистемой – энергия микросистемы возрастает. При втором виде взаимодействия происходит лишь частичное поглощение энергии, а часть энергии рассеивается. В третьем случае поглощение энергии идет с последующим испусканием ее – наблюдается излучение света.

Эти рассуждения относительно взаимодействия квантов света и микросистемы справедливы для анализа взаимодействия системы с электромагнитными колебаниями как видимого диапазона, так и для анализа взаимодействия с электромагнитными колебаниями ультрафиолетового, инфракрасного и сверхвысокочастотного диапазонов.

Поскольку микросистема включает в себя молекулы, атомы, ионы и электроны, то их энергетическое состояние (в полном соответствии с квантовой природой материи и энергии) можно представить в виде дискретного ряда энергии. Таким образом, можно отметить, что внутренняя энергия системы квантована. Частицы располагаются на соответствующих уровнях. Они могут совершать переход с одного уровня на другой. При этом переходе либо излучается энергия, либо она поглощается, что соответствует вполне определенному движению и ориентации частиц.

Изменение движения и ориентации может иногда происходить одновременно. Энергию частиц, находящихся на нижнем уровне, обозначим через  $E_1$ , а энергию частиц, находящихся на верхнем уровне, через  $E_2$ . В соответствии с условием Нильса Бора частота излучения определяется соотношением:

$$E_2 - E_1 = h\nu_{2-1}. \quad (7.3)$$

Таким образом, если сообщать системе дополнительную энергию на частоте перехода, то это можно графически представить, как переход частиц с нижнего уровня на верхний. Энергия системы возрастает. Если же система излучает энергию, то это графически можно представить как переход частиц с верхнего уровня на нижний.

Система, находящаяся в таком состоянии, может стать источником энергии, т.е. генератором.

Академиком А.М. Прохоровым было предложено использование системы из двух зеркал, между которыми следовало располагать среду [6]. При этом используется эффект многократного прохождения излучения через среду за счет отражения от зеркальных поверхностей. Этот эффект аналогичен получению положительной обработки связи в системе усиления. Он приводит к резонансному усилению электромагнитной энергии, которое определяется выражением

$$Q = A/(1 - \beta A), \quad (7.4)$$

где  $A$  – усиление без обратной связи,  $\beta$  – коэффициент обратной связи.

Когда произведение  $\beta A$  стремится к единице, то усиление стремится к бесконечности, и система начинает генерировать. Это один из важных моментов использования таких зеркал. Вторым моментом является следующее. Излучение многократно отражается от зеркальных поверхностей, образующих открытый зеркальный резонатор. Значительного усиления достигнут только те волны, которые распространяются перпендикулярно зеркалам. Остальные получают усиление тем слабее, чем под большим углом они направлены к поверхности зеркала. Следовательно, на выходе из резонатора энергия распределена в узком, почти параллельном пучке. Такой луч имеет малую расходимость. Она может быть подсчитана по формуле дифракции:

$$\Theta = 1,22(\lambda/d), \quad (7.5)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучаемой энергии,  $d$  – диаметр излучателя (диаметр среды, если она стержневого типа).

Таким образом, для получения индуцированного излучения необходимо обеспечить следующие условия:

- иметь среду, которая могла бы обеспечивать инверсную населенность уровней;

- создать перенаселенность верхнего энергетического уровня по сравнению с нижним, для чего использовать источник энергии, который переводил бы систему в возбужденное состояние. Таким источником может быть световая энергия, электронная бомбардировка, атомная энергия и др.;

- вывести энергию из резонатора, для чего одно из зеркал делается полупрозрачным либо с отверстием для вывода света определенной длины волны.

Для генерации излучения необходимо, чтобы число атомов на верхнем уровне  $E_1$  было бы больше числа атомов на нижнем уровне  $E_0$ . В естественных условиях на более высоком уровне при любой температуре всегда находится меньше частиц, чем на более низком. Принимают специальные меры, чтобы из двух рассматриваемых уровней верхний был заселен больше, чем нижний. Такое состояние вещества в квантовой электронике носит название активного состояния с инверсной (обращенной) заселенностью.

Существуют различные способы создания инверсной заселенности, которые зависят от конкретной схемы энергетических уровней, от свойств активных частиц. Рассмотрим создание инверсной заселенности с помощью оптического воздействия (накачки) в трехуровневой энергетической системе. По этой схеме впервые было получено монохроматическое излучение в рубиновом лазере.

Распределение заселенностей атомных состояний при отсутствии внешнего воздействия, т.е. отсутствии накачки, подчиняется закону Больцмана (рис. 7.1а). Переход из состояния  $E_1$  в  $E_0$  происходит по рассмотренной ранее двухуровневой схеме и является переходом, препятствующим генерации излучения.

При энергетическом внешнем воздействии, например оптическом воздействии ксеноновой ламповой вспышкой, активная среда интенсивно поглощает энергию. В результате поглощения большое число атомов может перейти на самый верхний энергетический уровень  $E_2$ , а оттуда спонтанно на уровень  $E_1$  (рис. 7.1б).

Достаточно интенсивная оптическая накачка приводит к тому, что значительное число атомов из основного состояния может перейти на уровень  $E_1$  и превзойти заселенность основного состояния  $E_0$ . Это состояние характеризуется как инверсная заселенность (рис. 7.1в). В последующий переход атомов с уровня  $E_1$  на уровень основного состояния  $E_0$  происходит с генерацией лазерного излучения. Этот переход является индуцированным, т.е. вынужденным, приводящим к излучению. Возможны и другие системы получения инверсной заселенности. В частности, более распространена четырехуровневая система получения инверсной заселенности для следующих активных частиц лазера – молекулы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  в газовых лазерах, ионы неодима в твердотельных системах и др.

Создание инверсной заселенности активных частиц является основным условием получения лазерного излучения. В качестве активной среды, называемой рабочим телом, в современных технологических лазерах используются различные газовые смеси, твердые тела и жидкости.

Оптическая накачка рабочего тела осуществляется потоком света от импульсной или непрерывно действующей газоразрядной лампы. Такой метод накачки используется для возбуждения лазеров, в которых рабочее тело является твердым или жидким.

При газоразрядном методе накачки активные частицы рабочего тела подвергаются воздействию электрического разряда. Этот метод накачки широко применяется для возбуждения лазеров, в которых рабочим телом являются различные газовые смеси.

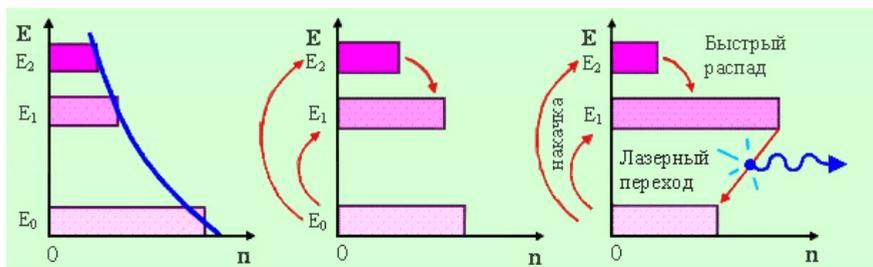


Рис. 7.1. Создание инверсной заселенности в трехуровневой системе

Рассмотренный энергетический переход в виде индуцированного (вынужденного) излучения заложен в основу работы оптических квантовых генераторов – лазеров. ОКГ является источником излучения, возбуждаемого непосредственно в нем. Схема лазера, состоящего из двух необходимых компонент, – активной среды в резонаторе, приведена на рис. 7.2. Активная среда 2 в соответствии с рассмотренными выше условиями обладает инверсной заселенностью. Оптический резонатор состоит из одного плоского непрозрачного зеркала 1 и параллельного ему плоского зеркала 3, частично пропускающего излучение с прозрачностью.

Для осуществления процесса генерации часть излучаемой световой энергии должна постоянно оставаться внутри активной среды для того, чтобы вызвать вынужденное излучение новых атомов. Это условие как раз и выполняется с помощью зеркала оптического резонатора (рис. 7.2). Зеркало 1 отражает всю падающую на него энергию, а полупрозрачное зеркало 3 пропускает только часть энергии, которая и является полезной энергией. Эту часть энергии в дальнейшем выводят из резонатора и с помощью фокусирующих систем концентрируют световое излучение в пятно небольших размеров в целях получения высокой плотности мощности. Часть энергии отражается в резонаторе полупрозрачным зеркалом 3 и служит для вовлечения в генерацию новых порций активной среды.

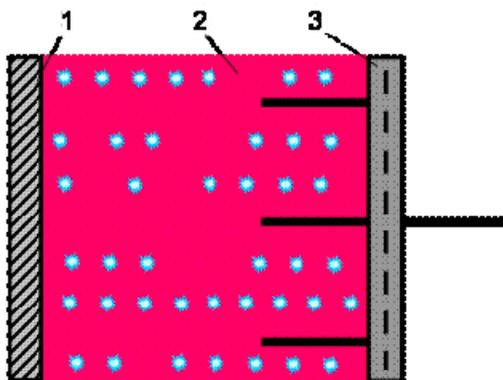


Рис. 7.2. Принципиальная схема квантового генератора

Таким образом, в квантовом генераторе с помощью оптического резонатора получают высокую интенсивность излучения, необходимую для эффективного осуществления процессов вынужденного излучения возбужденных частиц активной среды лазера. Оптические резонаторы не только значительно увеличивают вероятность индуцированных вынужденных процессов, но и определяют характеристики лазерного излучения.

Возобновление излучения возможно при внешнем подводе энергии. Этот процесс называется накачкой лазера.

Способы накачки зависят от конкретной схемы энергетических уровней, а также от свойств компонентов активной среды, называемой рабочим телом. В лазерных системах получили распространение оптический, газоразрядный, газодинамический и химический способы накачки.

Поясним механизм возбуждения на примере, когда в качестве активного вещества используется синтетический рубин с примесью хрома (рис. 7.3). В химическом отношении, рубин – полуторная окись алюминия ( $Al_2O_3$ ), в которой имеется примесь оксида хрома ( $Cr_2O_3$ ). Оптические свойства рубина, в том числе и «рубиновый» цвет, обусловлены ионами хрома, замещающими в узлах кристаллической решетки ионы алюминия. При облучении кристалла рубина мощным световым потоком лампы накачки ионы хрома переходят с основного уровня *C* на уровни *A* (рис. 7.3). Далее возбужденные ионы передают свою энергию невозбужденным ионам, в результате чего они оказываются на долгоживущем (метастабильном) уровне *B*. Этот уровень представляет собой два близко расположенных подуровня; вынужденный переход с каждого из них на основной сопровождается испусканием света с длиной волны 692 и 694 нм.

При освещении рубина белым или зеленым светом ионы хрома возбуждаются и переходят на верхний уровень, поглощая энергию зеленой части спектра. Из рисунка видно, что рубин выдает две полосы поглощения: в зеленой – 0,56 мкм и в синей – 0,48 мкм. Для получения усиления необходимо, чтобы в среднем не

менее половины ионов, находящихся в основном состоянии, перешло на верхний энергетический уровень. Этот уровень нестабилен, и частицы быстро совершают без излучения переход на промежуточный (метастабильный) уровень, который более стабилен, чем верхний. На промежуточном уровне может находиться значительное число частиц. При воздействии на кристалл слабого излучения на частоте перехода (или при самопроизвольном переходе одной из частиц с верхнего уровня на нижний) возникает индуцированное излучение, сосредоточенное в основном на волне 0,6943 мкм, и слабое – на волне 0,6929 мкм. Все частицы с промежуточного уровня совершают индуцированный переход на основной уровень синфазно и в короткий интервал времени. Это и создает когерентное излучение. Таким образом, видно, что стимулированное излучение представляет собой резонансный процесс и в силу этого более строго привязано к центру полосы частот, чем излучение спонтанное (самопроизвольное), испускаемое возбужденной частицей. Излучение этих «предпочтительных» частот, в свою очередь, возбуждает излучение на той же частоте. Относительная ширина линии излучения лазера составляет  $10^{-6}$ – $10^{-10}$ . Эту ширину хорошо сравнить с шириной используемого до появления лазеров оптического стандартного источника – лампы с парами натрия. Считалось, что такой источник «монохроматического» излучения может быть признан как эталонный. Он имел относительную ширину линии  $10^{-5}$ .

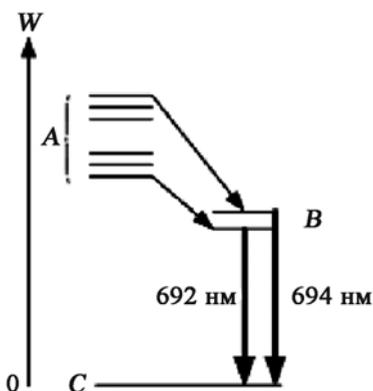


Рис. 7.3. Схема энергетических переходов

Лазерный излучатель – это сердце системы. От характеристик лазерного излучения зависит, какие материалы мы сможем обрабатывать, какие процессы будут протекать и многое другое. Высокая интенсивность лазерного излучения открывает широкие возможности его технологических применений в качестве инструмента. Лазерный луч – это уникальный тепловой источник, способный нагреть облучаемый участок детали до высоких температур за столь малое время, в течение которого тепло практически не успевает «растекаться». Нагревае-

мый участок может быть при этом размягчен, рекристаллизован, расплавлен, наконец, его можно испарить. Дозируя тепловые нагрузки путем регулировки мощности и продолжительности лазерного облучения, можно обеспечить практически любой температурный режим и реализовать различные виды термообработки. Длина световой волны в лазерном пучке только одна, следовательно, и цвет также один. Этот свет четко фокусируется линзой почти что полностью в одной точке, как показано на рис 7.4 а, а на рис. 7.4 б для сравнения показана фокусировка естественного светового потока. Благодаря концентрации в узком луче огромной энергии лазер способен передать этот луч на гигантские расстояния, избегая рассеяния и ослабления, присущие многоцветному естественному свету.

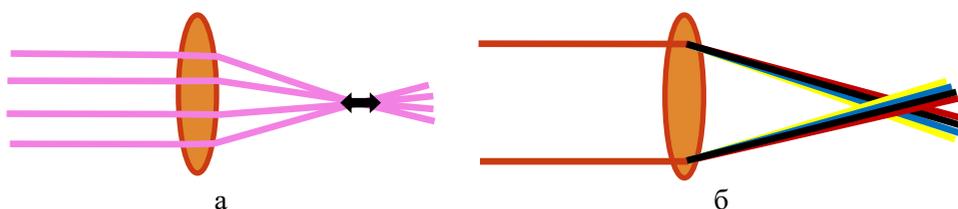


Рис. 7.4. Фокусировка светового потока

Рядом с со стержнем (цилиндром, являющимся рабочим телом) монтируется импульсная лампа. Цилиндр и импульсная лампа окружены зеркалом. Оно чаще всего изготовлено из кварца, на который нанесен слой металла. При помощи зеркала свет собирается на цилиндре.

Важный момент: состав активной среды таков, что у каждого ее атома есть как минимум три энергетических уровня, как было показано выше на рис. 7.1. В спокойном состоянии атомы активной среды располагаются на низшем энергетическом уровне  $E_0$ . Как только включается лампа, атомы поглощают энергию ее света, поднимаются на уровень  $E_1$  и довольно долго пребывают в таком возбужденном состоянии. Именно это и обеспечивает лазерный импульс.

**Инверсная заселенность** – фундаментальное физическое понятие. Это такое состояние среды, когда число частиц на каком-то верхнем энергетическом уровне атомов (любом из существующих) больше, чем на нижнем. Собственно, активной и называется та среда, в которой уровни являются инверсно заселенными.

Электроны атома не располагаются хаотично. Они занимают определенные орбиты, окружающие ядро. Атом, получающий квант энергии, с огромной вероятностью переходит в состояние возбуждения, характеризующееся сменой электронами орбиты – с самой низкой (метастабильной или основной) на обладающую более высоким уровнем энергии. На такой орбите длительное нахождение электронов невозможно, поэтому происходит их самопроизвольное возвращение к основному уровню. В момент возвращения каждый электрон испускает волну света. Одним атомом запускается цепная реакция, и электроны многих других

атомов также перемещаются на орбиты с более низкой энергией. Одинаковые световые волны движутся огромным потоком. Изменения этих волн согласованы во времени и в результате формируют общий мощный световой пучок. Этот пучок света и называется лазерным лучом. Мощность луча у некоторых лазеров настолько огромна, что им можно разрезать камень или металл.

Теоретически лазерный луч можно сфокусировать в пятно размером порядка длины волны, однако искажения, вносимые оптическими элементами, увеличивают радиус реального пятна фокусировки до  $r_0$ .

Для различных методов обработки  $r_0$  составляет: газовое пятно – 2 мм, электрическая дуга – 3 мм, световой луч – 1 мм; плазменная струя 0,05 мм; электронный луч 0,008 мм; лазерный луч – 0,0006 мм. Пятно фокусировки при лазерной обработке по сравнению с традиционными методами обработки имеет минимальные размеры, а значит, плотность мощности будет самая высокая. На рисунке 7.5 показана типичная схема построения лазерной установки.

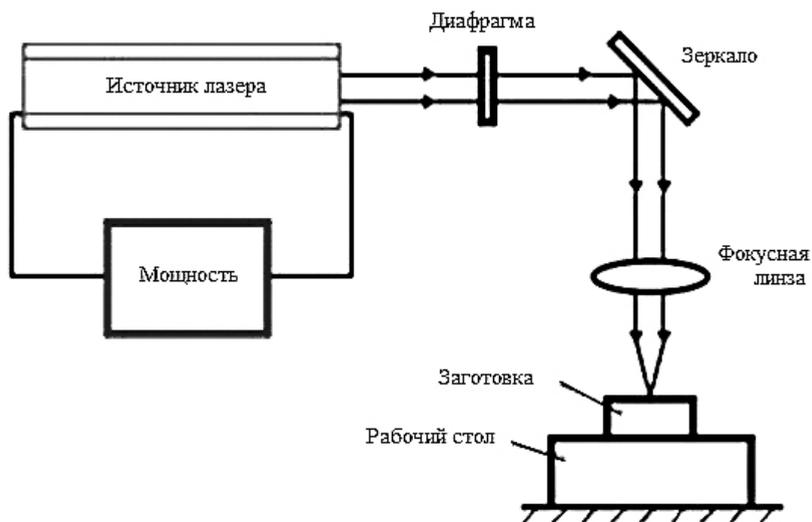


Рис. 7.5. Схема устройства лазерной установки

Лазерный луч отличается чрезвычайно высокой монохроматичностью и направленностью, что позволяет с помощью обычных оптических систем фокусировать его на площадку с характерным размером в доли миллиметра (в пределе порядка длины волны), достигая при этом рекордно высоких плотностей потока излучения. Современные непрерывные лазеры обеспечивают интенсивность сфокусированного излучения на уровне до  $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, а в импульсных системах, применяемых, например, для исследований в области лазерного термоядерного синтеза, эта величина достигает значений  $10^{16}$ – $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для сравнения можно указать, что средняя интенсивность солнечного излучения на поверхности Земли составляет около 0,1 Вт/см<sup>2</sup>, и при фокусировке ее можно увеличить до 10 Вт/см<sup>2</sup>.

## 7.2. Классификация лазеров и их некоторые характеристики

Приведенная ниже классификация не претендует на полноту и законченность, что объясняется следующими моментами: задачей было – дать лишь общее представление о принципе работы и применении лазеров, а кроме того, данная область техники не стоит на месте и разрабатываются всё новые системы.

Один из видов классификации лазеров основан на использовании понятия выходной мощности. Лазеры, у которых непрерывная (средняя) выходная мощность более  $10^6$  Вт, называют *высокомощными*. При выходной мощности в диапазоне  $10^5$ – $10^3$  Вт имеем лазеры *средней мощности*. Если же выходная мощность менее  $10^3$  Вт, то говорят о *маломощных* лазерах.

В зависимости от конструкции открытого зеркального резонатора различают лазеры с постоянной добротностью и лазеры с модулированной добротностью – у такого лазера одно из зеркал может быть размещено, в частности, на оси электродвигателя, который вращает это зеркало. В данном случае добротность резонатора периодически меняется от нулевого до максимального значения. Такой лазер называют лазером с Q-модуляцией.

Одной из характеристик лазеров является длина волны излучаемой энергии. Диапазон волн лазерного излучения простирается от рентгеновского участка до дальнего инфракрасного, т.е. от  $10^{-3}$  до  $10^2$  мкм. За областью 100 мкм лежит, образно говоря, «целина». Но она простирается только до миллиметрового участка, который осваивается радистами. Этот неосвоенный участок непрерывно сужается, и есть надежда, что его освоение завершится в ближайшее время.

Другой важной характеристикой лазеров является энергия импульса. Она измеряется в джоулях и наибольшей величины достигает у твердотельных генераторов – порядка  $10^3$  Дж. Третьей характеристикой является мощность. Энергия в единицу времени и дает мощность. Газовые генераторы, которые излучают непрерывно, имеют мощность от  $10^{-3}$  до  $10^2$  Вт. Милливаттную мощность имеют генераторы, использующие в качестве активной среды гелий-неоновую смесь. Мощность порядка 100 Вт имеют генераторы на  $\text{CO}_2$ . С твердотельными генераторами разговор о мощности имеет особый смысл. К примеру, если взять излучаемую энергию в 1 Дж, сосредоточенную в интервале времени в одну секунду, то мощность составит 1 Вт. Но длительность излучения генератора на рубине составляет  $10^{-4}$  с, следовательно, мощность составляет 10000 Вт, т.е. 10 кВт. Если же длительность импульса уменьшена с помощью оптического затвора до  $10^{-6}$  с, мощность составляет  $10^6$  Вт, т.е. мегаватт. Это не предел! Можно увеличить энергию в импульсе до  $10^3$  Дж и сократить его длительность до  $10^{-9}$  с и тогда мощность достигнет  $10^{12}$  Вт. А это очень большая мощность. Известно, что когда на металл приходится интенсивность луча, достигающая  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, то начинается плавление металла, при интенсивности  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> – кипение металла, а при  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> лазерное излучение начинает сильно ионизировать пары вещества, превращая их в плазму.

Еще одной важной характеристикой лазера является расходимость лазерного луча. Наиболее узкий луч имеют газовые лазеры. Он составляет величину в несколько угловых минут. Расходимость луча твердотельных лазеров около 1...3 угловых градусов. Полупроводниковые лазеры имеют лепестковое раскрытие излучения: в одной плоскости около одного градуса, в другой – около 10... 15 угловых градусов.

Следующей важной характеристикой лазера является диапазон длин волн, в котором сосредоточено излучение, т.е. монохроматичность. У газовых лазеров монохроматичность очень высокая, она составляет  $10^{-19}$ , т.е. значительно выше, чем у газоразрядных ламп, которые раньше использовались как стандарты частоты. Твердотельные лазеры, и особенно полупроводниковые, имеют в своем излучении значительный диапазон частот, т.е. не отличаются высокой монохроматичностью.

Очень важной характеристикой лазеров является коэффициент полезного действия. У твердотельных он составляет от 1 до 3,5%, у газовых 1... 15%, у полупроводниковых 40...60%. Вместе с тем принимаются всяческие меры для повышения к.п.д. лазеров, ибо низкий к.п.д. приводит к необходимости охлаждения лазеров до температуры 4...77 К, а это значительно усложняет конструкцию аппаратуры.

Функциональная схема такого лазера приведена на рис. 7.6. Он состоит из пяти блоков: излучающей головки, блока конденсаторов, выпрямительного блока, блока поджига, пульта управления. Излучающая головка преобразует энергию сначала в световую, а затем и в монохроматическое лазерное излучение. Блок конденсаторов обеспечивает накопление энергии, а выпрямительный блок служит для преобразования переменного тока в постоянный, которым и заряжаются конденсаторы. Блок поджига вырабатывает очень высокое напряжение, которым осуществляется первоначальная пробой газа в лампах-вспышках. Поскольку первый лазер был сделан при использовании в качестве активного вещества рубинового стержня, то расскажем о его устройстве. Излучающая головка рубинового лазера состояла из держателя рубина, осевой втулки, двух ламп накачки и цилиндрического рефлектора. Держатели рубина сменные и предназначены для фиксации рубиновых стержней различных размеров и диаметров.

Используемый в приборе рубин представлял собой окись алюминия, в которой часть атомов алюминия замещена атомами хрома. Количеством хрома определяется цвет рубина, так, бледно-розовый рубин содержит 0,05% хрома, красный – 0,5%. Производят такой искусственный рубин следующим образом. В печах при высокой температуре выращивают заготовки, называемые булями. Булям придают форму стержня. Торцевые поверхности стержня обрабатывают с высокой точностью и затем полируют. При обработке торцевых поверхностей их делают параллельными с точностью около 9... 19 угловых секунд и покрывают

серебряным или диэлектрическим слоем с высоким коэффициентом отражения. Чистота поверхности соответствует 12-му классу. Этот стержень помещают между двумя лампами-вспышками, которые, в свою очередь, находятся в цилиндрическом рефлекторе. Таким образом осуществляется распределение светового потока от ламп-вспышек на рубиновом стержне. Внутренняя поверхность рефлектора покрыта окисью магния, имеющей коэффициент отражения 0,9 – это обеспечивает увеличение к.п.д. излучающей головки.



Рис. 7.6. Функциональная схема оптического генератора

### 7.2.1. Твердотельные лазеры

Схема твердотельного лазера приведена на рис. 7.7. Твердый активный элемент 2 размещают в резонаторе между двумя зеркалами 1 и 3. Зеркало 1 полностью отражает всё падающее на него излучение, а зеркало 3 является полупрозрачным. Оптическая накачка активной среды осуществляется энергией газоразрядной лампы-вспышки 4. Для получения более эффективного облучения лампу 4 вместе с активным элементом 2 помещают в кожух 5, на внутреннюю поверхность которого нанесено отражающее покрытие типа серебра, золота и др. Кожух имеет эллиптическую форму, а лампа и кристалл размещаются в фокусах эллипса. Этим достигаются наилучшие условия равномерного и интенсивного освещения кристалла. Питание лампы-вспышки обычно осуществляется от специальной высоковольтной батареи конденсаторов 6.

Поглощенная стержнем энергия лишь частично превращается в энергию излучения лазера. Большая часть поглощенной световой энергии стержнем (50–70%) превращается в тепловую энергию, и расходуется на нагрев рабочего тела. Этот нагрев крайне нежелателен, так как он вызывает изменение энергетических уровней оптически активных атомов кристалла. Последующее повышение температуры рабочего тела до некоторой предельной приводит вообще к прекращению генерации излучения. Кроме того, при неравномерном нагреве

стержня в нем возникают температурные напряжения, которые могут привести к разрушению рабочего тела. В связи с этим в большинстве конструкций твердотельных лазеров предусмотрено охлаждение рабочего тела (чаще всего дистиллированной водой).

Разряд высоковольтной батареи конденсаторов обеспечивает интенсивную вспышку полихроматического света в лампе. Световое излучение осуществляет оптическую накачку активных атомов рабочего тела, которые поглощают энергию накачки, возбуждаются, занимают верхний энергетический уровень и далее при переходе на низший энергетический уровень генерируют излучение.

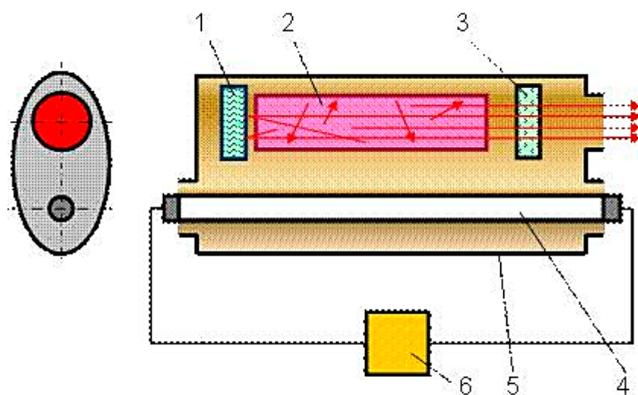


Рис. 7.7. Принципиальная схема твердотельного лазера

В рубиновом кристалле активными атомами являются атомы хрома в оксиде алюминия. Генерация лазерного излучения для этого кристалла осуществляется по трехуровневой системе. Начавшееся в рабочем теле излучение, как уже говорилось выше, распространяется по всему объему стержня и благодаря многократному отражению от зеркал в резонаторе в процесс генерации вовлекаются все оптически активные атомы. Часть излучения выходит из генератора через полупрозрачное зеркало 3. Диаметр луча, полученного лазерным излучением, примерно равен диаметру использованного кристалла. Плотность мощности выходного лазерного излучения сравнительно невелика. Последующей фокусировкой значительно уменьшают диаметр луча, в результате чего существенно возрастает плотность мощности лазерного излучения. В таком сфокусированном виде лазерное излучение используется для обработки материалов.

Твердотельный лазер генерирует излучение при облучении рабочего тела лампой до тех пор, пока мощность энергии накачки не станет меньше порогового значения, необходимого для поддержания генерации. Частота повторения импульса света лампы зависит от схемы электрического питания и от условий охлаждения рабочего тела.

Система питания и управления рубинового лазера приведена на рис. 7.8. Она состоит из высоковольтного выпрямителя, предназначенного для получения от промышленной сети выпрямленного тока напряжением 10 кВ, блока поджига ламп, служащего для получения импульса высокого напряжения, необходимого для начальной ионизации газа в лампах, блока питающих конденсаторов, измерительной аппаратуры и системы автоблокировки. Прибор работает следующим образом. Включением тумблера SA1, смонтированного на пульте управления, подается напряжение на автотрансформатор. С движка автотрансформатора часть напряжения подается на высоковольтный трансформатор Т1, который может иметь такое соотношение витков первичной и вторичной обмоток, что обеспечивает подачу на выпрямительное устройство напряжения до 3000 В. На выходе выпрямителя подключена батарея конденсаторов С1 (от 3 до 9 шт.) типа ИМ-5-150. Параллельно конденсаторам подключен киловольтметр, позволяющий контролировать напряжение, до которого заряжаются конденсаторы. Это напряжение через блокировочный контактор SA2 подается на две импульсные лампы ИФК-20007. Контактор SA2 управляется от двери шкафа, в котором размещены конденсаторы. При случайном или преднамеренном открывании шкафа конденсаторы через резистор R2 разряжаются на землю. В рабочем состоянии импульсные лампы все время подключены к заряженным конденсаторам. Однако это не приводит к их вспышке, так как требуемое пробивное напряжение значительно выше. Для обеспечения вспышки ламп служит система зажигания. Она работает следующим образом. Напряжение от сети подается на трансформатор Т3, с выходной обмотки которого снимается напряжение до 1000 В. Выпрямленным током заряжается конденсатор С2.

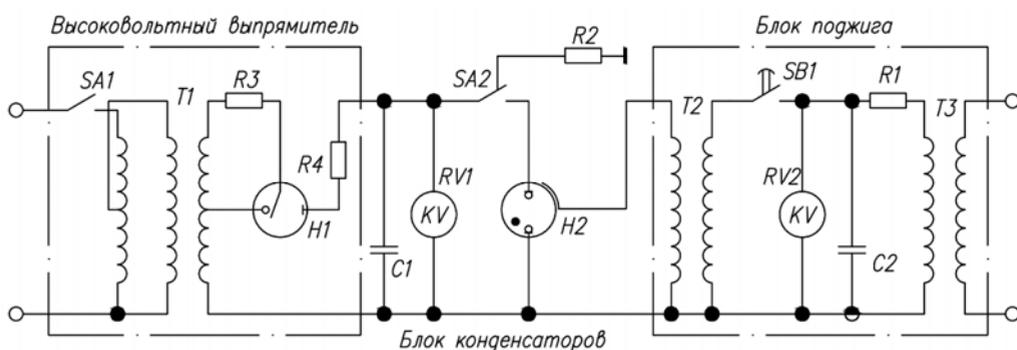


Рис. 7.8. Принципиальная схема системы питания лазера

После включения кнопки пуска SB1, установленной на пульте управления, конденсатор С2 разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора Т2. Во вторичной обмотке индуцируется высокое напряжение, достаточное для получения пробоя воздушного промежутка в импульсной лампе. Это напряжение подается на внешний электрод лампы. Ионизация газа в лампе приводит к резкому снижению сопротивления, и конденсаторы разряжаются через лампу, сопровождая разряд интенсивным свечением. Возникающее излучение и вызывает переход ионов хрома в возбужденное состояние. Поскольку только часть световой энергии ламп используется для этого – не более 90% – то к.п.д. таких генераторов составляет всего 0,5... 1,5%. Следовательно, простейшие подсчеты приводят к тому, что, если рубиновый лазер дает в импульсе 10 кВт, то общая потребляемая им мощность должна быть на два порядка, т.е. в 100 раз, больше. Стремясь повысить КПД лазеров, идут на всяческие технические ухищрения, позволяющие целесообразнее использовать потребляемую энергию. Так, например, используют не цилиндрический рефлектор, а эллипсоцилиндрический [7]. В таком рефлекторе лампа-вспышка карандашного типа расположена по одной фокальной оси, а по другой оси – рубиновый стержень. В соответствии с законом построения эллипса луч, вышедший из одного фокуса эллипса и упавший на образующую эллипса, проходит, отразившись от нее, через другую ось. Поэтому весь световой поток от лампы-вспышки должен пройти через рубиновый стержень. Другие излучающие головки имеют четыре-пять эллипсоцилиндрических отражателей с одним общим фокусом, в котором и располагается рубиновый стержень, а в остальных четырех-пяти находятся лампы-вспышки. В отечественных лазерах ГСИ-1 и ГОС-100 [7] в качестве активного вещества используется неодимовое стекло, например, в виде параллелепипеда с размерами  $8 \times 45 \times 150$  мм, или в виде цилиндра диаметром 25 и длиной 120 мм. Источником возбуждения в ГСИ-1 служат восемь импульсных ламп ИФК-2000. Излучаемая энергия достигает 100 Дж, длительность импульса 1,5 мс, что соответствует мощности примерно  $10^4$  Вт. Оба лазера излучают на волне 1,06 мкм.

Квантовые генераторы, работающие в таком режиме, называют лазерами со свободной генерацией. Их характеристики приведены в табл. 7.1, [7].

Если рассмотреть импульс излучения такого лазера, то оказывается, что он представляет собой ряд всплесков, или пиков.

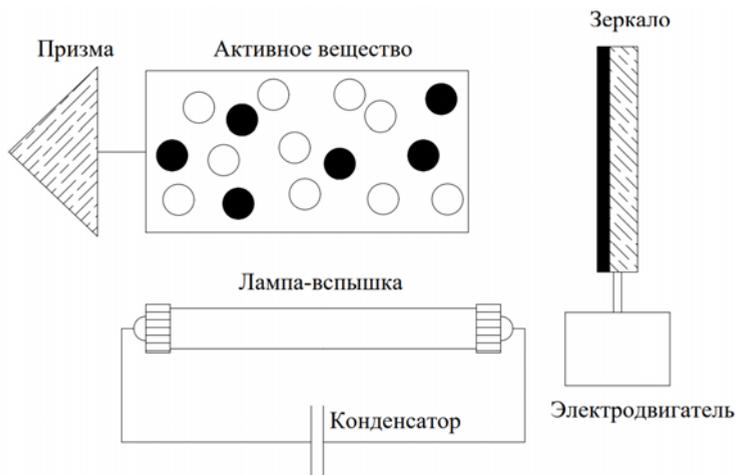
Такая неупорядоченная последовательность пиков во времени бывает неудобна при создании дальномеров или локаторов, и инженеры предложили сосредоточить излучение в очень коротком интервале времени, измеряемом миллиардными долями секунды.

### Характеристики твердотельных лазеров

Тип лазера	Активное вещество	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, с	Расходимость луча, мрад	Мощность Вт
Раздан	Рубин	3	$0,5 \cdot 10^{-3}$	50	$6 \cdot 10^3$
ГОР – 100М	Рубин	100	$1 \cdot 10^{-3}$	40	$10^5$
ГОР – 300	Рубин	300	$5 \cdot 10^{-4}$	30	$6 \cdot 10^5$
ГОС – 30	Стекло с неодимом	300	$8 \cdot 10^{-4}$	5	$3,7 \cdot 10^5$
ГОС – 1000	Стекло с неодимом	1000	$2 \cdot 10^{-2}$	3	$5 \cdot 10^4$
ЛТИ – 4	Гранат с неодимом	0,1	$4 \cdot 10^{-5}$	5	$2 \cdot 10^3$

Мощность импульса при той же энергии увеличивается в миллионы раз и равняется энергии, деленной на время. На рисунке 7.9 изображен лазер с модуляцией добротности резонатора. Одно из зеркал выполнено «глухим» – левое, а правое зеркало расположено на оси электродвигателя. Если это зеркало повернуто на  $90^\circ$  по отношению к тому, что изображено на рисунке, то добротность резонатора равна нулю, и в этом случае стимулированного излучения быть не может, хотя возможно перевести все ионы хрома в возбужденное состояние, т.е. осуществить накачку активного вещества энергией. Если теперь резко перевести правое зеркало в положение, когда оно станет перпендикулярно оси активного вещества, то добротность резонатора станет максимальной. В стержне мгновенно возникает генерация. Вся энергия, запасенная в возбужденных ионах активного вещества, высвобождается в одном коротком импульсе. Его иногда называют «гигантским». Длительность такого импульса составляет  $10^{-9}$  с, а мощность около 50 МВт.

Помимо таких вращающихся зеркал в качестве оптических затворов используют различные ячейки, например ячейку Керра, ультразвуковую ячейку и др. В последнее время стали использовать в качестве оптических затворов просветляющиеся фильтры. Их действие основано на том, что они меняют свою прозрачность под действием светового потока. Один из таких фильтров работает следующим образом.



**Рис. 7.9. Лазер с модуляцией добротности**

Он сделан в виде кюветы с раствором металлической соли фталоцианина, которая помещается между стержнем лазера и одним из зеркал. Раствор сильно поглощает свет на частоте генерации рубина, поэтому усиление света с помощью резонаторов не происходит (добротность резонатора равна нулю). Но в это время осуществляется накачка активного вещества энергией. Когда энергия накачки увеличится до значения, при котором усиление рубина превысит потери на поглощение в растворе фталоцианина, лазер начнет довольно слабо излучать когерентный свет. Небольшое количество этого дополнительного света оказывается достаточным для обесцвечивания раствора настолько, чтобы он стал совершенно прозрачным. В этот момент сразу пойдет резкое увеличение генерации и вся накопленная энергия будет мгновенно выпущена в виде мощного импульса. После этого раствор быстро возвращается в свое исходное состояние и вновь готов к образованию следующего импульса. Основные характеристики таких лазеров приведены в табл. 7.2 [7]. Но не вся энергия света лампы накачки преобразуется в лазерную вспышку. Большая часть энергии, увы! – уходит на вредный нагрев стержня и зеркал. Охлаждаются лазеры потоком воды, воздуха, а иногда и жидким азотом. Частота повторения импульсов зависит от того, насколько хорошо стержень лазера выдерживает высокую температуру. Рубиновые и неодимовые лазеры дают одну-две вспышки в секунду, лазер на гранате – несколько сотен. Рекордная частота генерации для импульсного лазера – двенадцать миллионов вспышек в секунду. Излучение таких лазеров воспринимается уже как непрерывное. Мощность таких лазеров можно сравнить с мощностью нескольких крупных электростанций и составляет тысячи ватт.

Но есть и недостатки твердотельных лазеров: во-первых, они достаточно дорогие, стержни могут выходить из строя из-за перегрева, и коэффициент полезного действия таких лазеров невелик – 5–8%.

### Характеристики лазеров с модуляцией добротности

Тип лазера	Активное вещество	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, нс	Мощность импульса, кВт	Тип оптического затвора
ОГМ-20	Рубин	0,42	20	$2 \cdot 10^4$	Электрооптический
ЛТИПЧ-1	Стекло с неодимом	2	15	$1 \cdot 10^5$	Просветл. фильтр.
ЛТИ-5	Гранат неодимом	0,05	10	$5 \cdot 10^3$	Электрооптический

#### 7.2.2. Газовые лазеры

В газовых лазерах активная среда формируется из газов с очень низким давлением или из их смесей. Газы заполняют стеклянную трубку, в которую впаиваются электроды. Газовая среда облегчает получение непрерывного стимулированного излучения, поскольку для перевода вещества в возбужденное состояние требуется меньшая энергия. В качестве активного вещества может применяться смесь гелия и неона. Атом гелия в процессе газового разряда возбуждается электронами тока и переходит с основного уровня 1 на уровень 2. При столкновении атомов гелия с атомами неона последние также возбуждаются и совершают переход на один из четырех верхних подуровней (рис. 7.10). В связи с тем, что перераспределение энергии при столкновении двух частиц происходит с минимальным изменением общей внутренней энергии, то атомы неона переходят в основном именно на уровень 2, а не на уровень 3 или 4. Вследствие этого создается перенаселенность верхнего уровня 2. При переходе атомов неона с уровня 2 на один из подуровней 3 и с уровня 3 на уровень 4 происходит излучение. Поскольку уровень 2 состоит из четырех, а уровень 3 – из десяти подуровней, то теоретически имеются более тридцати возможных переходов. Однако только пять переходов дают стимулированное излучение, которое сосредоточено на длинах волн: 1,118; 1,153; 1,160; 1,199; 1,207 мкм.

В качестве активного вещества практически можно использовать все инертные газы. Получено излучение от чистого неона, криптона, ксенона, аргона, от гелий-ксеноновой смеси, аргона-кислородной смеси и др. Получено излучение от паров цезия, от паров воды, от паров ртути, от углекислого газа.

Значительное развитие получил газовый лазер, работающий на смеси азота с углекислым газом. Его излучение сосредоточено на волне 10,6 мкм, и работает он в непрерывном режиме. Отличается высоким КПД – до 75%. Поскольку излучение такого лазера приходится на «окно прозрачности» атмосферы, то он широко используется для связи, а за рубежом для моделирования систем поражения.

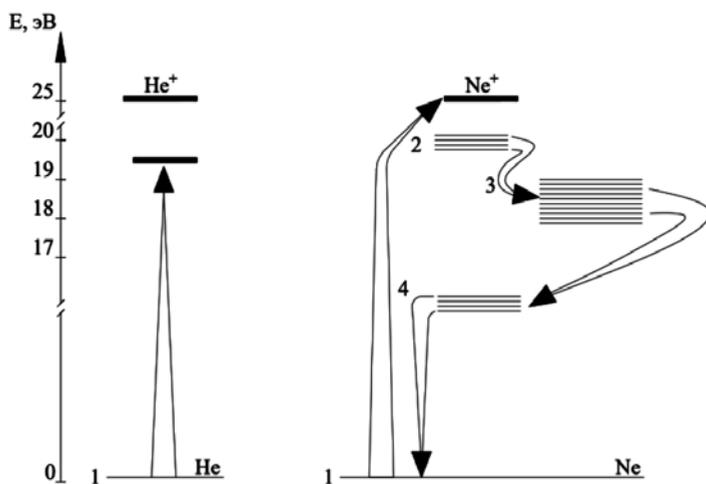


Рис. 7.10. Схема энергетических уровней гелий-неоновой смеси

Характеристики некоторых отечественных газовых лазеров приведены в табл. 7.3 [7].

Таблица 7.3

### Характеристики отечественных газовых лазеров

Тип лазеров	Длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт	Угловая расходимость, мин	Излучающая головка	
				Габариты, см	Масса, кг
ЛГ-24М	0,63–1,15	$10^{-3}$	20	125 × 25 × 26	17
ЛГ-45	0,63	$7 \cdot 10^{-2}$	10	50 × 11 × 12	5
ЛГ-55	0,63	$2 \cdot 10^{-3}$	10	35 × 7 × 6	1
ЛГ-65	1,15	$2 \cdot 10^{-2}$	15	110 × 15 × 12	24
ЛГ-75М	3,39–3,51	$10^{-2}$	10	105 × 10 × 11	10
Малахит	0,45–0,51	0,2–0,5	–	87 × 41 × 24	40
Клен	0,45–0,51	0,2	–	80 × 40 × 20	40
Прометей	1,06	50	–	180 × 15 × 15	–

### 7.2.3. Газодинамические и эксимерные лазеры

По большому счету эти два вида можно классифицировать как газовые лазеры.

Газодинамический лазер по принципу работы схож с реактивным двигателем. В нем по сути происходит сгорание топлива, в которое добавлены частицы газов активной среды. В процессе сгорания молекулы газов приходят в возбуждение, а потом, будучи охлажденными сверхзвуковым течением, испускают мощнейшее когерентное излучение, тем самым отдавая энергию.

Работу эксимерных лазеров обеспечивают особые молекулы, которые всегда находятся в возбужденном состоянии.

#### 7.2.4. Жидкостные лазеры

Первые жидкостные лазеры появились почти тогда же, когда и твердотельные – в 60-х гг. XX в. Для создания активной среды в них используются разнообразные растворы органических соединений. Плотность такого вещества выше, чем у газа, хотя и ниже, чем у твердых тел. Поэтому такие лазеры способны генерировать достаточно сильное излучение (до 20 Вт), а работать они могут и в импульсном, и в непрерывном режимах. В качестве накачки в них используются импульсные лампы или другие лазеры. Оптическая однородность жидкостей не уступает однородности газов, а значит позволяет использовать большие её объёмы, их легко прокачивать через рабочий объём, непрерывно поддерживая её низкую температуру и высокую активность её атомов (рис. 7.11).

В этих лазерах рабочей средой служат жидкие диэлектрики с примесными рабочими атомами. Оказалось, что, растворяя редкоземельные элементы в некоторых жидкостях, можно получить структуру энергетических уровней, очень сходную со структурой уровней примесных атомов в твердых диэлектриках, поэтому принцип работы их тот же, что и твердотельных. Преимущества жидкостных лазеров очевидны: во-первых, не нужно ни варить стекло высокого качества, ни растить булы для кристаллов. Во-вторых, жидкостью можно заполнять любой объём, а это облегчает охлаждение активного вещества путем циркуляции самой жидкости в приборе.

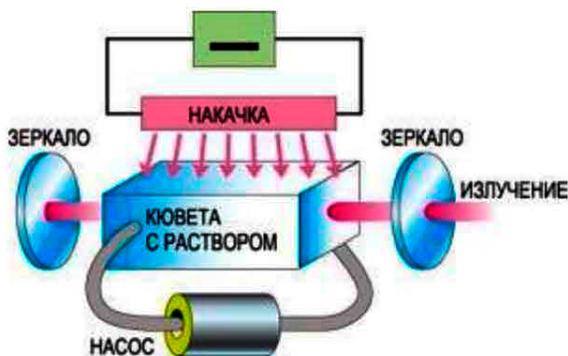


Рис. 7.11. Схема жидкостного лазера

Разработан метод получения жидких активных веществ с примесями гадолиния, неодима и самария. При экспериментах по получению стимулированного излучения жидкое вещество помещали в резонатор со сферическими зеркалами,

подобно тем, которые используют в газовых лазерах. Если лазер работал в импульсном режиме, то в специальном охлаждении жидкого вещества не было необходимости. Если же прибор работал в непрерывном режиме, то активное вещество заставляли циркулировать по охлаждающей и рабочей системам.

Был создан и исследован жидкостный лазер с активным веществом, которое излучало в диапазоне 0,5 ... 0,58 мкм (зеленая часть спектра). Это излучение хорошо проникает в воду на большие глубины, поэтому такие генераторы представляют интерес для создания подводных локаторов.

В последнее время для возбуждения жидкостных лазеров используют излучение твердотельных лазеров. При таком возбуждении кювета с жидкостью помещалась внутри резонатора рядом с рубиновым стержнем. Кроме того, там же помещался оптический затвор, изготовленный на ячейке Керра. Было получено импульсное излучение до десятков мегаватт при длительности около 3–30 нс. Это излучение, длина волны которого составляла 0,69 мкм, направлялось на кювету с органической жидкостью, на выходе из которой наблюдалось лазерное излучение на нескольких длинах волн. Частоты этого излучения равнялись сумме или разности частот передающего излучения и частот собственного колебания молекул в инфракрасном диапазоне. Для сравнения приведем данные о длинах волн: дейтерий-бензол – 0,74; 0,79 мкм, пиридин – 0,74; 0,80 мкм, толуол – 0,74 мкм, нитробензол – 0,76; 0,85; 0,96 мкм, бром-нафталин – 0,76 мкм, циклогексан – 0,86 мкм, бензол – 0,74; 0,88; 0,80 мкм. Достоинством жидкостных лазеров является возможность быстрой перестройки длины излучаемой волны путем замены жидкости в кювете.

Однако жидкостные лазеры имеют и два существенных недостатка: нестойкость жидкости по отношению к большим интенсивностям света (и накачки, и генерации), а также изменение коэффициента преломления активного вещества в процессе генерации от нагревания. Это приводит к тому, что генерируемый луч «гуляет» по торцу резонатора.

### *7.2.5. Полупроводниковые лазеры*

В полупроводниковом лазере в качестве активной среды используется кристалл-полупроводник, например арсенид галлия GaAs. Поэтому на первый взгляд его можно было бы отнести к твердотельным лазерам. Однако он принципиально отличается тем, что излучательные переходы в нем происходят не между энергетическими уровнями атомов, а между энергетическими зонами или под-зонами кристалла [6]. Приоритет созданию полупроводникового лазера принадлежит советским ученым. Уже в 1958 г. Н.Г. Басовым и его сотрудниками было указано на возможность использования полупроводниковых материалов в качестве активных сред. И тогда же отмечалось, что применение полупроводников даст возможность непосредственно преобразовывать энергию электрического тока в энергию когерентного излучения.

Принцип работы полупроводникового лазера (рис. 7.12) может быть объяснен следующим образом. Электроны в полупроводнике могут занимать две широкие энергетические полосы. Нижняя представляет собой валентную зону, а верхняя – зону проводимости. В нормальном чистом полупроводнике при низкой температуре все электроны связаны и занимают энергетический уровень, расположенный в пределах валентной зоны. Если на полупроводник подействовать электрическим током или световыми импульсами, то часть электронов перейдет в зону проводимости. В результате перехода в валентной зоне окажутся свободные места, которые в физике называют «дырками». Эти дырки играют роль положительного заряда. Произойдет перераспределение электронов между уровнями валентной зоны и зоны проводимости, и можно говорить, в определенном смысле, о перенаселенности верхней энергетической зоны. В некоторых полупроводниках, подобных арсениду галлия, в результате обратного перехода электронов из зоны проводимости с более высокого уровня в валентную зону и их соединения с дырками, т.е. при рекомбинации разноименных носителей заряда, происходит излучение фотонов.



Рис. 7.12. Внешний вид полупроводниковых лазеров

Для уменьшения ширины запрещенной зоны в полупроводник вводят примеси, которые создают отдельные местные энергетические зоны. Чтобы создать инверсную населенность, используют различные методы – либо перевозбуждают с помощью оптического излучения, либо ударной ионизацией, либо с помощью импульсов электрического тока. Последний метод позволяет получить инверсную населенность в полупроводниках с различной шириной запрещенной зоны. Это приводит к тому, что возникают предпосылки к получению излучения в диапазоне от далекой инфракрасной области до ультрафиолетовой. При этом относительно легко получить КПД около 40...50%.

Здесь в качестве активного вещества используется арсенид галлия, содержащий примеси  $p$ -типа, концентрация которых составляет  $10^{17}$ – $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Из этого материала делается заготовка в форме параллелепипеда или куба. Она обычно называется полупроводниковым диодом. Размеры диода очень невелики и составляют доли миллиметра. Диод припаивают к молибденовому основанию, покрытому золотом, для того чтобы обеспечить контакт с  $p$ -областью. На поверхность  $p$ -области наносят сплав золота с серебром. Торцы диода играют роль зеркал, поэтому они тщательно полируются, а стороны их делают параллельными, чтобы они играли роль резонатора. Излучение выходит именно из этих сторон диода. Верхняя и нижняя стороны являются контактами, к которым прикладывается напряжение. В начальный период, когда сила тока, протекающего через диод, невелика, ширина спектральной полосы излучения довольно большая, а при превышении током порогового значения полоса резко сужается. Пространственное излучение лазерного диода имеет форму лепестка. Лазерный диод может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах. И весьма важным достоинством такого лазера является то, что излучение на его выходе очень просто модулировать. Для этого достаточно модулировать ток, питающий его, и тогда излучение на выходе будет промодулировано с той же частотой. В качестве активного вещества используют также фосфид галлия, сурьмянистый индий, сурьмянистый галлий; арсенид–фосфид–галлия и др. Один из первых образцов полупроводниковых лазеров был представлен на Лейпцигской ярмарке в 1965 г. Он имеет марку «Луч-3». Размеры кристалла из арсенида галлия составляли 0,03 мм. Он находился в термостате с жидким азотом при температуре минус 196°С. Работал в импульсном режиме на волне 0,844 мкм, имея длительность около 2 мкс. Мощность излучения в импульсе достигала 10 Вт.

Накачка такого лазера производится постоянным электрическим током. Грани кристалла-полупроводника тщательно полируются, и из них получается отличный резонатор.

### **7.2.6. Волоконные лазеры**

Идея волоконных лазеров состоит в том, чтобы реализовать все оптические компоненты твердотельного лазерного излучателя внутри единого оптического волокна. Что это нам дает: Отсутствие подвижных узлов и узлов, которые необходимо юстировать. Беспрецедентная стабильность и надежность. Тонкое многометровое волокно отлично отдает тепло, так как имеет огромную площадь по отношению к сечению. Отсутствие термических деформаций и разрушений.

Принцип работы волоконных лазеров основан на отражении света фотодиода в волокне большой протяженности (рис. 7.13). В качестве волоконного материала используется кварц, активированный добавками редкоземельных элемен-

тов. На рисунке 7.13 изображены: 1 – торцевые зеркала; 2 – оптическое кварцевое волокно; 3 – активированное световедущее волокно; 4 – светоотражающее покрытие; 5 – защитная оболочка; 6 – лазерный луч; 7 – фокусирующая линза; 8 – светодиоды.

Для получения мощности 2...10 кВт существуют каскадные волоконные системы, включающие задающий волоконный лазер и усиливающие ступени. Излучения волоконных лазеров соединяются в отдельном лазере, что позволяет повысить мощность каждой ступени. Количество ступеней предопределяет конечную мощность.

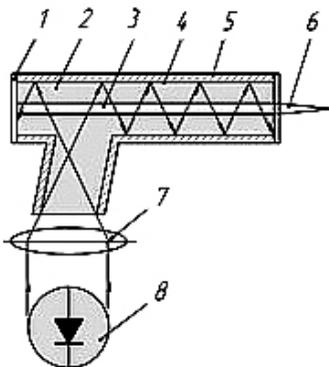


Рис. 7.13. Схема волоконного лазера с активированной боковой накачкой

Диаметр сердцевины оптического волокна кабеля доставки мощностью 1кВт составляет 50...100 мкм, а мощностью 10 кВт составляет 200...400 мкм.

Эксплуатация волоконных лазеров по сравнению с газовыми и твердотельными лазерами существенно упрощается, поскольку практически не требуется настройка, юстировка, чистка. Волоконные лазеры допускают размещение в обычных производственных помещениях, без выполнения специальных требований.

Волоконные лазеры оказались идеальными для использования в оптических системах телекоммуникации, позволили создать мощные лазерные системы для промышленного применения. Выделяемое излучение, возникающее от волоконных лазеров, не соприкасается с окружающей средой, что обеспечивает высокую надежность, исключительную устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям. Данные лазеры технологичны в изготовлении, имеют большой ресурс работы и практически не нуждаются в обслуживании при эксплуатации. Расходимость выходного излучения при этом увеличивается, но остается вполне приемлемой для большинства практических применений.

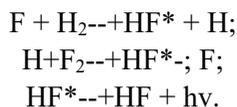
Параметры волоконного лазера YLR50000: максимальная мощность – 55 кВт; потребляемая мощность 170 кВт; диаметр волокна – 200 мкм; длина выходного волокна – 20 м.

Волоконные лазеры обеспечивают высококачественную резку металлов со скоростью в 3–5 раз выше, чем CO<sub>2</sub> – лазеры той же мощности.

Применение уникальных диодов для накачки позволяет получать оборудование с эффективностью 45% и сроком службы 100 000 ч.

### 7.2.7. Химические лазеры

Химическим лазерам прогнозируют интенсивное практическое использование в самом ближайшем будущем. Для химического лазера имеется принципиальная возможность работы без внешнего источника электрической энергии, так как вся необходимая энергия может быть получена за счет химической реакции. Например, в одном из наиболее перспективных химических лазеров основные процессы могут быть представлены следующей серией реакций



В первой реакции для инициирования необходим свободный атом фтора. Одной из постоянных проблем химических лазеров является разработка методов эффективного получения таких свободных атомов. Возбужденная молекула HF (обозначаемая HF\*), возникающая при такой реакции, может находиться в возбужденном состоянии, являющемся верхним уровнем лазерного перехода. Третья реакция выражает переход в нижнее лазерное состояние, которое не заселяется при химической реакции. Оно сопровождается испусканием квантов световой энергии  $h\nu$ . Таким образом, инверсия населенностей возникает автоматически всякий раз после того, как протекает химическая реакция, и в качестве конечного продукта возникают молекулы в возбужденном состоянии. Для инициирования реакции, т.е. для первоначального создания свободных атомов, может потребоваться электрическая энергия, но как только реакция началась, образуются свободные атомы и эти реакции будут непрерывно продолжаться. Наиболее хорошо разработанными лазерами являются лазеры на фтористом водороде, работающие на многих длинах волн, расположенных в диапазоне 2,6...3,6 мкм, а также лазер на окиси углерода, генерирующий на длинах волн около 5 мкм. Химические лазеры, работающие в непрерывном режиме, дают выходную мощность около нескольких киловатт. Они работают без электрического питания, используя смешение втекающих химических компонентов. Такой лазер похож на работающий реактивный двигатель, поскольку рабочая химическая смесь со сверхзвуковой скоростью прокачивается через резонатор, а энергия, выделяющаяся при химической реакции, из резонатора с помощью зеркал выводится в требуемом направлении.

### 7.3. Лазерные комплексы

Для реализации лазерной обработки материалов, кроме самих лазеров, необходимы системы фокусировки луча, устройства управления движением луча по поверхности обрабатываемого изделия или устройство для перемещения изделия относительно луча, оптические устройства наведения и позиционирования, программное обеспечение процессами управления [8].

В соответствии с технологическими задачами лазерные комплексы включают следующие виды оборудования: излучатели, системы формирования и перемещения излучения; координатные устройства, автоматизированную систему управления, систему подачи технологического газа; систему вентиляции и удаления продуктов лазерного воздействия.

*Излучатель* генерирует лазерное излучение. В его состав входят элементы системы накачки, активная среда, зеркала резонаторов, устройство модуляции излучения.

*Система формирования и перемещения излучения* предназначена для передачи лазерного пучка от излучателя к обрабатываемой детали и формирования требуемых параметров лазерного луча. В состав данной системы входят: юстированный лазер, оптический затвор, оптические трансформаторы (объективы), поворотные зеркала, устройства вращения плоскости поляризации; фокусирующая система; система стабилизации положения фокальной плоскости зеркал.

*Автоматизированная система управления (АСУ)* предназначена для контроля и управления параметрами лазера, передачи команд на исполнительные модули координатного устройства и системы формирования и перемещения излучения. В состав АСУ входят: подсистема датчиков параметров лазера (температуры, давления, состава рабочей смеси и др.); подсистема датчиков параметров излучения; подсистема управления адаптивной оптикой; подсистема управления координатным устройством.

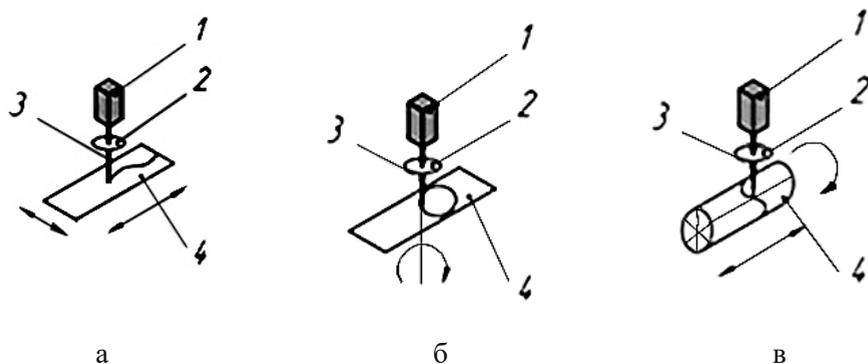
*Координатное устройство* обеспечивает относительное перемещение лазерного луча и детали. Оно содержит двигатель, привод, исполнительные механизмы и обеспечивает перемещение по двум, трём и даже пяти координатам.

*Система подачи технологического газа* включает компрессор при работе с воздухом или баллоны с сжатым технологическим газом, элементы масло- и влагоотделения, трубопроводы подачи газа в рабочий орган.

*Система вентиляции и удаления продуктов технологического процесса* состоит из мощного вентилятора, обеспечивающего удаление продуктов процесса из рабочей зоны и системы фильтров для улавливания твёрдых частиц.

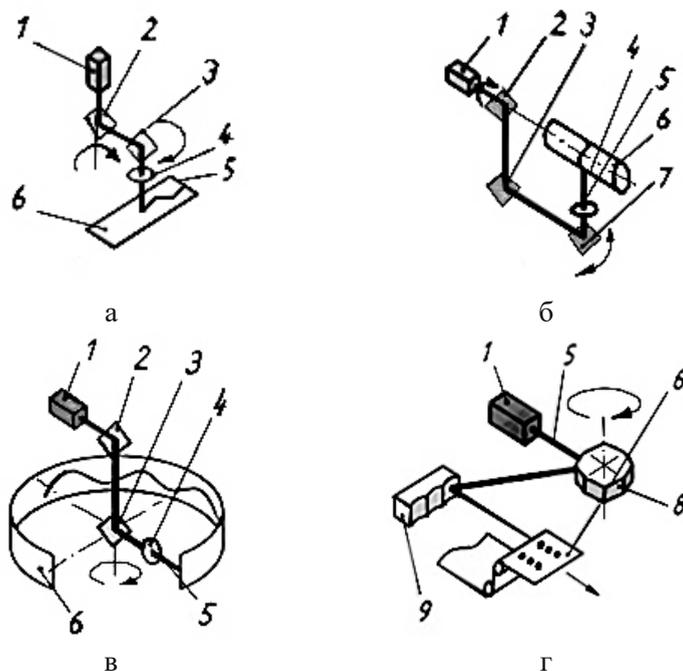
Способы передачи лазерного излучения в зону обработки условно подразделяют на две группы: с постоянным и переменным направлением оптического тракта от излучателя лазерной обработки до зоны обработки.

Передача излучения с постоянным направлением оптического тракта может осуществляться поступательным (рис. 7.14 а) или вращательным (рис. 7.14 б) перемещением изделия, излучателя, либо одновременно того и другого (рис. 7.14 в). На рисунке 7.14 цифрами обозначены: 1 – излучатель; 2 – объектив; 3 – луч лазера; 4 – обрабатываемая заготовка. В простейшем случае передача выполняется с помощью фокусирующего объектива, установленного между неподвижным излучателем лазерной установки и обрабатываемой заготовкой.



**Рис. 7.14. Схемы передачи излучения при постоянном направлении оптического тракта**

Перемещение крупногабаритных заготовок в процессе обработки технологически нецелесообразно. Перемещение излучателей ограничено системой кабелей высокого напряжения, шлангов для подачи газов, охлаждающей жидкости и т. д. При стационарном положении заготовки и излучателя целесообразно применение способа передачи лазерного излучения переменным направлением оптического тракта. Изменение направления лазерного луча осуществляется поворотными зеркалами и подвижными объективами. На рисунке 7.15 даны схемы передачи излучения при переменном направлении оптического тракта: так на рис. 7.15 а – при вращательном движении зеркал 2,3 относительно оптической оси; на рис. 7.15 б – при вращательном движении зеркал 2,3,7 и объектива относительно оптической оси излучения и оси заготовки; на рис. 7.15 в – вращение зеркал 2, 3 и объектива 4; на рис. 7.15 г – вращение зеркального барабана 8. Цифрами на рис. 7.15 показаны: 1 – излучатель; 2,3,7 – подвижные зеркала; 4 – объектив; 5 – луч лазера; 6 – заготовка; 8 – зеркальный барабан; 9 – система неподвижных зеркал.



**Рис. 7.15. Схемы передачи излучения при переменном направлении оптического тракта**

Обычно лазерные комплексы включают неподвижный стол, на котором закрепляют заготовки, подвижный портал с одной или двумя лазерными головками. Заготовка остаётся неподвижной, а лазерный луч перемещается по поверхности заготовки.

Повышение требований к надёжности и качеству высокотехнологичной продукции, стремление к миниатюризации приборов привели к росту спроса на лазерные комплексы для прецизионной микрообработки. Лазерные технологии микрообработки позволяют осуществлять микросварку, резку, сверление сверхмалых отверстий в матрицах и фильерах из сверхтвёрдых материалов, фрезерование и формообразование, размерную обработку, изготовление сверхплотных масок и трафаретов, послойное удаление плёнок, реструктуризацию и многие другие технологии микро- и нанообработки.

Спрос на лазерную микрообработку вырос в связи с развитием ещё одного перспективного направления – энергосберегающих технологий, в том числе фотоэлементов нового поколения.

Для решения этих задач традиционных комплексов недостаточно. Хотя средняя мощность лазеров в технологических комплексах для микрообработки, как правило, не превышает 100 Вт, пиковые её значения должны составлять от

единиц до десятков и более мегаватт, а плотность мощности в лазерном пятне должна быть достаточной для испарения (возгонки) материала. При этом следует обеспечить быстрое взаимное перемещение объектов обработки и лазерного луча с субмикронной точностью.

## 7.4. Практическое применение лазеров

### 7.4.1. Лазеры в научных исследованиях

Методы дальнометрирования в геодезии с использованием света основаны на том, что в однородной среде оптическое излучение на всем пути распространяется прямолинейно и с постоянной скоростью. Поскольку в геодезическом оптическом дальнометре передатчик и приемник обычно совмещены, то расстояние между дальнометром и объектом может быть найдено из простого соотношения:

$$L = \frac{ct_L}{2},$$

где  $C$  – измеряемое расстояние,  $c$  – скорость света,  $t_L$  – время прохождения света от дальнометра до объекта и обратно.

Таким образом задача определения расстояния между дальнометром и объектом сводится к определению соответствующего интервала времени между зондирующим импульсом и импульсом, отраженным от объекта.

Из приведенного соотношения следует, что ошибка измерения дальности будет определяться соотношением:

$$\Delta L = \frac{L}{c} \Delta t_L + \frac{c \Delta t_L}{2},$$

где  $\Delta L$  – ошибка в измерении дальности,  $\Delta t_L$  – ошибка в измерении времени прохождения света от дальнометра до объекта и обратно.

Первая – это степень определения скорости излучения (т.е. наши знания о скорости света), а вторая – определяется инструментальной точностью геодезического дальнометра. Известно, что значение скорости света равно 299 792,5 км/с, а относительная ошибка  $0,6 \cdot 10^{-6}$ . Вне зависимости от вида устройства может быть использован импульсный или фазовый метод измерения дальности. На рисунке 7.16 приведена схема гипотетического импульсного дальнометра [7]. Видно, что в качестве источника излучения используется твердотельный лазер и резонатор, в котором возможна модуляция добротности. Затем имеется приемно-передающая оптическая система и ряд блоков, назначение которых понятно из надписей на схеме. Дальнометр работает таким образом. Излучение лазера с помощью оптической системы направляется в сторону объекта, до которого необходимо измерить расстояние. Часть излучения с помощью полупрозрачного зеркала отводится на приемник излучения – опорный ФЭУ (фотоэлектронный умножитель) и направляется на блок измерения запаздывания для формирования

опорного сигнала. Отраженное объектом излучение принимается оптической системой и направляется на сигнальный ФЭУ, сигнал с которого, пройдя усилитель, также попадает на блок измерения времени запаздывания. В этом блоке определяется время между опорным и отраженным сигналами. В качестве индикатора дальности может быть использована либо электронно-лучевая трубка, либо счетно-решающий прибор, показывающий непосредственную величину измеряемой дальности. Ошибки отсчета определяются способом отсчета расстояния, масштабом, крутизной зондирующего и отраженного объектом импульсов. Не рассматривая подробно все эти факты, остановимся на одном из них, а именно на крутизне переднего фронта импульсов. Крутизна зондирующего импульса у лазеров с модулированной добротностью может быть очень большой. Если она составляет даже 10% от длительности импульса, то при импульсе в  $10^{-8}$  с имеем потенциальную возможность измерять расстояния с точностью до 0,3 м. Однако крутизна переднего фронта отраженного импульса будет другой, она зависит от степени искажений, возникающих в приеме-передающей системе (в среде, где происходит распространение оптического излучения) и искажениями при отражении от объекта. Это приводит к уменьшению потенциально возможной точности измерения дальности.

Ошибка в измерении дальности зависит от двух причин.



Рис. 7.16. Функциональная схема импульсного дальномера

Лазерный дальномер, для не столь больших расстояний как расстояние от Земли до Луны, работает на аналогичном принципе. Импульсный лазер посылает луч на объект, от которого луч отражается. Детектор излучения принимает отраженный луч. Приняв в расчет время между началом излучения и тем моментом когда детектор поймал отраженный луч, а также скорость света, электроника прибора рассчитывает расстояние до объекта.

Лазер незаменим в геной инженерии и нанотехнологиях (которые работают с объектами размером порядка миллионной доли миллиметра –  $10^{-9}$  м). При помощи лучей лазера преодолеваются масштабные ограничения – разрезаются, передвигаются и соединяются между собой невидимые для глаза составляющие части генов, биологических молекул и нанотехнологические детали. Лазерные локаторы, используются для исследований свойств атмосферы и космических тел.

Современные ученые ставят перед собой цель создать термоядерную реакцию. Для этого лазерными лучами необходимо сжимать ампулу со смесью дейтерия с тритием (так называемый термоядерный синтез).

В биохимических исследованиях на тему образования и работы белков полезны сверхкороткие лазерные импульсы фемтосекундной длительности. Данные импульсы позволяют инициировать и изучать химические реакции с высоким временным разрешением, чтобы находить и исследовать даже мало живущие химические соединения.

Изменяя поляризацию светового импульса, ученые могут задать необходимое направление химической реакции, выбрав из нескольких возможных сценариев развития событий в ходе реакции строго определенный.

Оптический пинцет на основе лазера позволяет при помощи света от лазерного диода манипулировать микроскопическими диэлектрическими объектами: к объектам прикладываются силы в пределах нескольких наноньютонов, также измеряются крошечные расстояния от нескольких нанометров. Данные оптические приборы применяются сегодня в исследовании белков, их структуры и работы.

#### *7.4.2. Лазерная связь*

Появившиеся лазеры вывели на принципиально новый уровень технику связи и записи информации.

Радиосвязь, развиваясь, постепенно переходила на все более короткие длины волн, поскольку было доказано, что высокие частоты (с наименьшей длиной волны) предоставляют каналу связи наибольшую пропускную способность. Настоящим прорывом стало понимание того, что свет – это такая же электромагнитная волна, просто короче во множество десятков тысяч раз. Следовательно, через лазерный луч возможно передавать объем информации, в десятки тысяч раз превосходящий объем, передаваемый высокочастотными радиоканалами, что повлекло усовершенствованию различных видов связи по всему миру.

Также при помощи луча лазера записываются и воспроизводятся компакт-диски со звуками – музыкой, и с изображениями – фотоснимками и фильмами. Индустрия звукозаписи, получив такой инструмент, сделала гигантский шаг вперед.

#### **7.4.3. Архитектура, геодезия и стройиндустрия**

Еще одно замечательное свойство лазерного луча – его идеальная прямота. Это позволяет использовать его как самую точную «линейку». Также в строительстве и геодезии при помощи импульсных лазеров производят измерения огромных расстояний на местности, засекая время, за которое световой импульс проходит от одной точки до другой.

Лазерные уровни можно увидеть сегодня практически в каждом строительном магазине. Это довольно востребованный инструмент, отличающийся невысокой стоимостью. Для удаления поверхностных загрязнений с предметов, памятников, произведений искусства, а также, для очистки изделий от радиоактивных загрязнений. Данный способ очистки лишен недостатков, свойственных механическому шлифованию, абразивной обработке, виброобработке и т. д.

#### **7.4.4. Боевое и оборонительное лазерное оружие**

К настоящему времени сложились основные направления, по которым идет внедрение лазерной техники в военное дело. Этими направлениями являются:

- 1) лазерная локация (наземная, бортовая, подводная);
- 2) лазерная связь;
- 3) лазерные навигационные системы;
- 4) лазерное оружие;
- 5) лазерные системы ПРО и ПКО, создаваемые в рамках стратегической оборонной инициативы – СОИ.

Достоверной информации по этим вопросам в открытой печати не так много, см. например [8].

**Лазерный прицел.** В большинстве военных применений лазер используется для облегчения наведения какого-либо оружия на цель. Например, лазерный прицел – это маленький лазер, обычно работающий в видимом диапазоне и прикрепленный к стволу пистолета или винтовки так, что его луч параллелен стволу. Благодаря очень малой расходимости лазерного луча, даже на больших расстояниях прицел даёт маленькое пятнышко. Стрелок просто наводит это пятно на цель и таким образом видит, куда именно направлен ствол оружия. В большинстве прицелов используют лазерный диод с излучением красного цвета («красный» диод). Некоторые используют инфракрасный диод, чтобы получить пятно, не видимое невооруженным глазом, но различимое приборами ночного видения.

В 2007 г. компания Lasermax, специализирующемся на выпуске лазеров для военных целей, объявила о начале первого массового производства «зелёных» лазеров, доступных для стрелкового оружия. Предполагается, что луч «зеленого» лазера будет более заметным в условиях яркого солнечного света вследствие более высокой чувствительности сетчатки человеческого глаза к зеленой области спектра.

**Системы обнаружения снайперов.** Принцип действия таких систем основывается на том, что лазерный луч, попадая на прицел оружия снайпера, будет отражаться от линз и прочих оптических элементов прицела. Преимуществом таких систем является то, что они активны, т.е. обнаруживают снайперов до выстрела, а не после. С другой стороны, эти системы демаскируют себя, так как являются излучателями. Возможна постанровка помех путем «сканирования» лазерным лучом местности, не позволяя вражеским снайперам вести прицельную стрельбу или даже наблюдение в оптические приборы.

**Введение противника в заблуждение.** Главное назначение таких систем – предотвратить нападение со стороны противоборствующей стороны. Лазерный луч небольшой мощности направляется в сторону противника (в основном, эта технология используется против авиации и танков, а так же на морском флоте). В результате этого противник полагает, что на него нацелено высокоточное оружие; он вынужден замаскироваться или отступить вместо нанесения собственного удара.

**Лазерные дальномеры** уже упоминались выше, поэтому на них останавливаться не будем.

**Лазерное наведение.** Такие системы имеют в своем составе лазер небольшой мощности, «подсвечивающий» цель. Ракета или бомба, выпускаемая с самолета, автоматически изменяет траекторию полета, ориентируясь на отраженный от цели луч, что обеспечивает высокую точность попадания. Лазерный излучатель может находиться как на самом самолёте, так и на земле. В устройствах лазерного наведения обычно используются инфракрасные лазеры, так как их работу проще скрыть от противника.

**Лазерное стрелковое оружие.** Главное военное применение лазеров, которое возникает в сознании неспециалиста, обычно связывается с использованием их в конструкции стрелкового оружия, способного уничтожать живую силу и технику. На практике такие идеи сразу наталкиваются на серьёзное препятствие – при современном уровне технологий лазер, способный нанести повреждение человеку, окажется слишком тяжёлым (с учётом источника питания) для переноски в одиночку. Устройство, обладающее достаточной мощностью для выведения из строя техники, будет крайне громоздким и чувствительным к вибрациям, что исключает его полевое применение. В первую очередь это объясняется весьма низким КПД лазера: для получения достаточного для поражения цели количества

излучаемой энергии необходимо затратить в десятки (иногда сотни) раз больше её для накачки рабочего тела лазера. Например, для нанесения повреждения, аналогичного удару снаряда авиационной пушки тридцатого калибра, требуется лазерный импульс мощностью около 5 килоджоулей; импульс с энергией 1,6 килоджоуль будет эквивалентен 9-мм пуле стрелкового оружия. С учетом к.п.д. источник питания лазера должен выдать мощность в десятки раз большую. Именно масса источников для накачки лазера в значительной степени определяют габариты подобного оружия. Кроме того, из-за низкого к.п.д. лазера в конструкции оружия необходима система охлаждения для отвода тепла. Если же охлаждение будет неэффективно, скорострельность оружия резко снизится. Следует отметить, что проблема теплоотвода отчасти решена в лазерах с химической накачкой (например, кислородно-йодном и дейтерий-фторном лазерах большой мощности, где отработанные химические компоненты выбрасываются из системы после импульса, унося тепло. При этом, однако, для эффективной работы лазера требуется большой запас этих реагентов (некоторые из них агрессивны) и соответствующие ёмкости для хранения.

Таким образом, в настоящее время создание эффективного стрелкового вооружения для применения в полевых условиях проблематично. Остаётся возможность использования лазера для ослепления противника, поскольку для этой цели нужны лазеры совсем небольшой мощности, которые можно сделать портативными.

***Лазерные имитаторы стрельбы и тренажеры.*** Помимо прямого воздействия лазерного излучения на объекты поражения, имеются сообщения о применении лазеров в имитаторах стрельбы и тренажерах. Благодаря малой расходимости луча, использование в таких системах лазеров позволяет значительно повысить реальность имитации попадания в цель. При этом обеспечивается «безопасность» стрельбы, а также возможность проводить тренировки в любое время суток. В сообщениях делается вывод, что лазерные имитаторы, которыми предполагается оснастить танковые подразделения, позволят разыгрывать бои в условиях, максимально приближенных к боевым. Так как имитаторы стрельбы и тренажеры соответствуют по дальности стрельбы тем видам оружия, которые они имитируют, т.е. в пределах от сотни метров до нескольких километров, то в данном случае предполагается использовать маломощные твердотельные лазеры, газовые и полупроводниковые лазеры, простые по конструкции, надежные в эксплуатации, безопасные для «противника». Отмечается, что влияние тумана и дымки на прохождение лазерного излучения в атмосфере дает положительный эффект для тренировок. Опыт показывает, что если условия стрельбы ухудшаются, но наводчик видит цель в пределах возможностей своего оружия, то излучение лазера также достигает цели.

Тренажер включает два комплекта аппаратуры: первым оборудуется наводчик, вторым – объект поражения: танк, самолет, вертолет и т.п. Аппаратура наводчика содержит оптический прицел, через который он наблюдает объект поражения и удерживает перекрестье прицела на цели, лазерный источник излучения и блок управления его работой, пульт регистрации попадания и приемник попаданий. На объекте поражения устанавливается блок имитатора попаданий. Он состоит из набора фотоприемников, размещенных на объекте в различных его точках (на башне, на защитном щитке водителя, на баке с топливом и т.д.), и командного устройства, включающего в работу световой, звуковой или дымовой имитатор, который указывает экипажу о поражении танка, а также наводчику – о попадании в объект поражения.

Быстродействие лазерных тренажеров дает возможность использовать их для имитации стрельбы любых средств поражения по целям, обладающим любой начальной скоростью. В такие имитаторы включаются устройства, обеспечивающие задержку «выстрела» в целях приведения его в соответствие с полетным временем снаряда или пули, а также при стрельбе по движущимся целям с упреждением. Проведенные испытания позволяют сделать вывод, что при использовании тренажеров качество подготовки стрелков и наводчиков повышается; при этом существенно сокращается стоимость учебных стрельб за счет экономии боеприпасов и за счет многократного использования мишеней.

Лазерные имитаторы стрельбы и тренажеры непрерывно совершенствуются. Если в первых сериях тренажеров в качестве источника излучения применялся рубиновый лазер, то впоследствии он был заменен лазером полупроводникового типа на арсениде галлия. Затем изменениям подверглась прицельная система. В нее были включены дополнительные линзы и зеркала, которые имитируют введение упреждения при стрельбе по движущимся целям и установку требуемого угла возвышения. Прицеливание производится по результатам измерения дальности с помощью лазерной дальномерной приставки, которая выдает величину коррекции направления луча с тем, чтобы установка прицела соответствовала истинному расстоянию до цели и баллистике имитируемого снаряда. Приемники лазерного излучения расположены по периметру башни танка. При попадании луча лазера, имитирующего выстрел орудия, на один из приемных фотодетекторов, включается блок радиостанции, который посылает стреляющему танку сигнал о поражении цели. Одновременно в танке цели включается сигнальное устройство, информирующее экипаж о поражении их танка. Кроме того, баллон, смонтированный на башне танка, начинает дымить в течение 30 с. Иногда вместо одного баллона устанавливают ряд петард, что дает гораздо больший эффект.

### 7.4.5. Лазер в медицине

Лазерные технологии широко применяются как в хирургии, так и в терапевтических целях. Например, через тонкий кварцевый капилляр прокачивается специально обработанная кровь (см. рис. 7.17). Излучение лазера направляется на прозрачный капилляр и вызывает флюоресценцию клеток крови. Флюоресцентное свечение улавливается чувствительными датчиками. Это свечение специфично для каждого типа клеток крови, проходящих поодиночке в области лазерной засветки.

Поэтому имеется возможность подсчитать их количество в заданном объеме крови, а также получать с высокой точностью количественные показатели по каждому типу клеток. Этот принцип использован в приборе, который называется *гемоцитометр*. Производительность этого прибора в сотни раз превышает производительность анализа крови лаборантом традиционным способом. И точность, и объективность результатов также существенно выше [9].

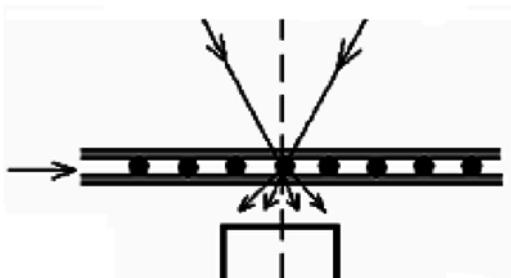


Рис. 7.17. Применение лазерного излучения для диагностики крови

Еще более совершенным диагностическим лазерным анализатором является *проточный флуориметр*, в котором клетки перед проходом через капилляр окрашиваются специальными красителями, так что появляется возможность не только исследовать отдельные типы, но и разновидности типов клеток крови. При этом возможен анализ не только клеток крови, но и любых других клеточных элементов, выделенных из любых тканей организма для диагностики. Данная диагностика – новая и перспективная область лазерной медицины. Ее практическая реализация еще только начинается, и большинство исследований находятся в стадии экспериментальной разработки и испытаний

Исторически сложилось так, что окулисты первые обратили внимание на возможность использования лазера и внедрили его в клиническую практику. Из наиболее серьезных глазных заболеваний, которые приводят к слепоте, выделяют: глаукому, катаракту, отслоение сетчатки, диабетическую ретинопатию, злокачественную опухоль сосудистой оболочки. Чтобы в них разобраться,

напомним строение глаза (рис. 7.18). Глаз состоит из следующих элементов: хрусталика 5, роговицы 4, радужной оболочки с отверстием в центре 6, кольцевой мышцы 2, охватывающей хрусталик, внутриглазной жидкости 3, стекловидного тела 1, сосудистой оболочки 7, сетчатки 8 светочувствительного слоя) и зрительного нерва 9. Болезнь, называемая глаукомой, возникает следующим образом. В пространстве между роговицей и хрусталиком находится внутриглазная жидкость. Она вырабатывается небольшой железой, находящейся у края радужной оболочки. Эта жидкость омывает переднюю часть хрусталика и выводится из глаза через дренажную систему радужной оболочки. Если дренажная система нарушится, то происходит задержка и накопление внутриглазной жидкости в глазу. Возрастает ее давление. Появляются боли, ухудшается зрение – возникают радужные ореолы, очертания предметов становятся туманными. Так развивается глаукома. Наибольшее число случаев потери зрения связано именно с этой болезнью. Причем, чаще всего поражаются люди старше 40 лет. Методы, которыми их лечили ранее, сложны. Они травмируют глаз. Новые методы основаны на использовании лазерного излучения. Первые операции сводились к «прожиганию» отверстий в радужной оболочке с тем, чтобы восстановить ее дренажные свойства. Ряд проделанных операций показал, что прожигание вызывает воспаление, которое быстро ликвидирует сделанные протоки. Внутриглазное давление снова возрастало. Были проведены дополнительные исследования учеными под руководством академика М.М. Краснова. Они показали, что следует не «прожигать» протоки в оболочке, а пробивать их. А для этого нужно не тепловое воздействие, а механическое, путем образования ударной волны. Это может сделать короткий импульс. Разработали и аппаратную реализацию метода, которая получила название «Ятаган». В ней используется лазер на рубине с длительностью импульса  $10^{-7}$  с. Воздействие таких коротких импульсов на глазные ткани дает минимальное воспаление. Советские ученые имеют приоритет в деле создания методов лечения глаукомы, это подтверждается еще и тем, что аппаратура «Ятаган» не имеет зарубежных аналогов. Она запатентована в ФРГ, США, Канаде, Англии, Франции и Италии.

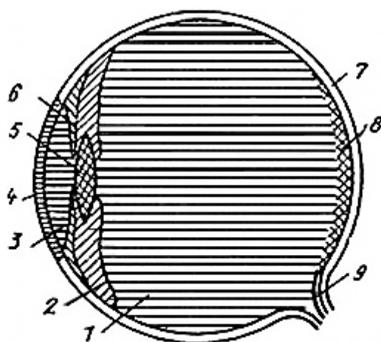


Рис.7.18. Схема строения глаза

В современной хирургии при сложных операциях используется лазерный скальпель, который минимизирует повреждение живых тканей.

В типичном лазерном скальпели используется  $CO$  – лазер; его излучение по оптоволоконному световоду попадает в выходную трубку, которую держит в своей руке хирург. Он может свободно перемещать ее в пространстве, тем самым направляя лазерный луч в нужное место. На конце выходной трубки есть маленькая указка; она служит для наведения луча (излучение  $CO$  – лазера невидимо). Луч фокусируется в точке, которая находится на расстоянии 3–5 мм от конца указки. В фокусе лазерного луча концентрируется энергия, достаточная для того, чтобы быстро нагреть и испарить биологическую ткань. Перемещая «лазерный скальпель», хирург рассекает ткань. Глубина разреза зависит от скорости перемещения и от степени кровенаполнения ткани. В среднем она составляет 2–3 мм. Часто рассечение тканей выполняют не в один, а в несколько приемов, рассекая как бы послойно. В отличие от обычного скальпеля, лазерный скальпель не только рассекает ткани, но может также сшивать края разреза, иными словами, может производить биологическую сварку

Действительно, рассечение производят сфокусированным излучением (хирург должен держать выходную трубку на таком расстоянии от ткани, чтобы точка, в которой фокусируются лучи, оказалась на поверхности ткани). При мощности излучения 20 Вт и диаметре сфокусированного светового пятна 1 мм достигается плотность мощности  $2,5 \text{ кВт/см}^2$ . Излучение проникает в ткань на глубину около 50 мкм. Следовательно, объемная плотность мощности, идущая на нагрев ткани, достигает  $500 \text{ кВт/см}^3$ . При этом происходит их быстрое разогревание и испарение. Если же луч расфокусировать (для этого достаточно немного отодвинуть конец выходной трубки от поверхности ткани) и тем самым снизить интенсивность примерно до  $25 \text{ Вт/см}^2$ , то ткань испаряться не будет, но будет происходить поверхностная коагуляция, т.е. «биологическая сварка» разрезанной ткани.

Несомненным достоинством лазерного скальпеля является то, что он обеспечивает полную стерильность (с тканью взаимодействует только излучение). Луч лазера действует локально; испарение ткани происходит только в точке фокуса. Прилегающие участки ткани повреждаются при этом значительно меньше, чем при использовании обычного скальпеля. Как показала клиническая практика, рана от лазерного скальпеля относительно быстро заживает.

В косметологии активно используются диодные и пикосекундные лазеры.

#### ***7.4.6. Индустрия развлечений***

Лазеры нашли широкое применение в индустрии развлечений. Многие знакомы с лазерным шоу: такие представления часто сопровождают фестивали, концерты, праздничные мероприятия. Лазерное шоу может быть создано как

внутри помещения, так и на свежем воздухе. Организатор способен выбрать оборудование под свои задачи и проецировать изображение любой сложности в любом цветовом диапазоне.

Так, одним из самых ярких и масштабных событий, которое сопровождалось лазерным шоу, стал концерт знаменитого музыканта Jean-Michel Jarre на Воробьевых горах в 1995 г. Он был приглашен Юрием Лужковым по случаю празднования 850-летия Москвы. Музыкант выступал перед зданием МГУ, во время мероприятия на фасад университета проецировались фрагменты истории города.

Но в наше время лазерным шоу никого не удивит. В Нью-Йорке в ноябре 2012 появилась кратковременная лазерная установка с названием Global Rainbows – 35-километровым лазерным лучом в небо. Установка представляла собой пучок из семи мощных лазерных лучей всех цветов радуги, которые могли быть направлены как в одну сторону, так и в разные. Конструкция была установлена после того, как на город обрушился ураган «Сэнди» в октябре 2012 г. Гигантская радуга показывала: город пережил катастрофу, и его жизнь продолжается.

## **7.5. Использование лазеров в промышленности**

К наиболее общим достоинствам лазерных технологий можно отнести следующие:

- отсутствие механического воздействия при обработке со стороны инструмента на обрабатываемую деталь. Это позволяет обрабатывать тонкие, легкодеформируемые миниатюрные изделия без опасения их повреждения;
- высокая концентрация подводимой энергии и локальность. Это позволяет произвести обработку только локального участка материала без нагрева остального объема, нарушения его структуры и свойств. Высокая локализация обеспечивает выполнение уникальных прецизионных операций микро-обработки материалов;
- высокая технологичность лазерного луча, проявляющаяся в возможности управления параметрами луча и его положением в пространстве, открывает широчайшие перспективы для применения (резка, обработка отверстий, термическая обработка, наплавка, маркировка и др.).

### ***7.5.1. Лазерная резка металлов***

Лазерной резкой называется такой вид лазерной обработки, при котором сфокусированное излучение разрушает материал, а струя сжатого газа выдувает продукты с образованием узкого канала – реза. Механизмы разрушения материала включают процессы нагрева, плавления, испарения, химические реакции.

Значительное влияние на интенсивность процессов нагрева оказывает поглощающая способность металла, зависящая от температуры поверхности, теплопроводности, длины волны, угла падения луча на поверхность.

Разрушение материала путём плавления и последующего испарения связано с достаточно высоким энергопотреблением. Существенное снижение энергозатрат достигается при использовании газа для удаления расплавленного металла из зоны резания.

Простейшая конструкция лазерного резака представлена на рис. 7.19, на нем изображены: 1 – луч лазера; 2 – зеркало; 3 – корпус; 4 – тубус; 5 – линза; 6 – сопло. Для подачи газа в зону резки между линзой 5 и заготовкой размещено сопло 6 в виде усечённого конуса. Газ, выходящий под давлением из сопла, кроме технологических функций, обеспечивает защиту линзы от продуктов обработки.

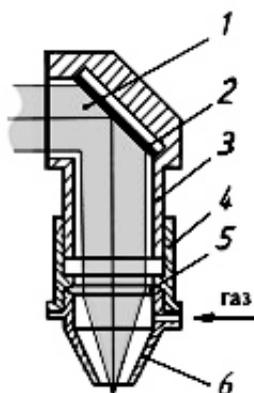


Рис. 7.19. Схема конструкции лазерного резака

Высокая концентрация энергии в сфокусированном лазерном луче дает возможности для разрезания почти любого известного материала, при этом рез получается узким, а зона термического воздействия минимальной. Соответственно отсутствуют и значимые остаточные деформации. При газолазерной резке металлов различают стационарный режим разрушения, когда жидкая ванна расплава существует по всей длине канала реза и, нестационарный, характеризуемый периодическим выносом расплавленного металла из зоны обработки. Стационарный режим разрушения достигается в том случае, когда скорости плавления металла в направлении реза и удаления расплавленного металла равны в каждом сечении канала. Скорость резания зависит от вида материала, его толщины, мощности излучения и составляет порядка нескольких метров в минуту.

Скорость  $V$  резки будет определяться выражением:

$$V = \frac{L}{t} = n \cdot D_0 \cdot K_n / t,$$

где  $t$  – время обработки;  $L$  – длина реза,  $n$  – количество импульсов;  $D_0$  – диаметр элементарной лунки,  $K_n = T/D_0$ ;  $T$  – шаг обработки.

Нестационарный режим осуществляется путём периодического плавления металла до достижения определённого объёма ванны, которая уносится из зоны обработки. Периодичность удаления жидкого металла является причиной образования на поверхности неровностей в форме борозды.

При резке в импульсном периодическом режиме скорость резки  $V$  будет определяться частотой следования импульсов  $f$ , при этом выражение будет выглядеть следующим образом:

$$V = D_0 \cdot K_n \cdot f.$$

Приведенная зависимость скорости резания справедлива при небольшой толщине разрезаемого материала. Выполнение перфорации в изделии выполняется чаще всего при импульсном режиме работы лазера, причем она может осуществляться как на всю толщину изделия, так и в виде пазов, имеющих заданную глубину. С увеличением толщины материала каждое элементарное отверстие образуется под воздействием нескольких импульсов. После перемещения луча в направлении обработки на величину шага  $T$  передний край светового пятна, попадая на верхнюю кромку материала, образует очередное элементарное отверстие. Одновременно остальная часть излучения углубляет ранее образованное элементарное отверстие. При этом полная глубина реза зависит от количества подводимых импульсов в каждое элементарное отверстие в процессе движения луча. Количество импульсов  $n$  зависит от шага обработки.

Глубина реза растёт с увеличением энергии излучения и уменьшением скорости резания, однако беспредельно увеличиваться она не может. Это происходит вследствие уменьшения плотности энергии излучения по мере проникновения вглубь реза. При снижении этого параметра до некоторого порогового значения  $q_n$  дальнейший рост реза вглубь прекращается. Предельно достижимая глубина резания равна:

$$h_{\max} = \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \left( \sqrt{\frac{E}{\pi}} q_n - \frac{D_0}{2} \right).$$

Максимально возможная скорость обработки, при которой ещё будет происходить формирование реза, может быть найдена из условия  $K_{\Pi} = 1$ , а  $T = D$

$$V_{\max} = 2f \left[ \left( \frac{D_0}{2} \right)^3 + \frac{3E}{\pi E_u} \operatorname{tg} \gamma \right]^{1/3}.$$

В последние годы наметилась тенденция расширения применения лазеров в ювелирной отрасли. Наиболее широкое распространение получили станки для обработки с твердотельными лазерами на алюмоиттриевом гранате, излучение

которых достаточно хорошо поглощается основными материалами ювелирной промышленности – драгоценными металлами и камнями. Часть технологических процессов лазерной обработки полностью отработана и внедрена в ювелирной отрасли, некоторые процессы и технологии находятся в стадии разработки, и возможно, в скором времени могут быть применены для обработки изделий.

Лазерный луч с большим успехом применяется для резки неметаллических материалов, таких как пластмасса, стеклопластики, резина, асбест; композиционные материалы на основе бора, углерода, керамики и др. Неметаллические материалы, как правило, обладают меньшей теплопроводностью, чем металлы и поэтому удельные энергозатраты снижаются.

В процессе лазерной резки решающую роль играет выдувание из зоны резки мелкодисперсной и капельной фракции. С целью повышения эффективности резки, применяют поддув в зону резания активного или нейтрального газа, который выдувает испаренные капельные фракции и производит охлаждение локального участка, позволяя резать материалы с малым обугливанием и оплавлением.

Исключения составляют материалы на основе фенолформальдегидных смол. Эти материалы под воздействием лазерного излучения превращаются в вязкую окисленную массу, которую трудно удалить из реза с помощью газовой струи. Поэтому требуются большие энергозатраты на испарение продуктов разрушения. Газолазерная резка позволяет получать чистый срез диэлектриков с хорошим качеством кромки. При наличии достаточной мощности излучения лазера можно осуществлять процесс лазерной резки стекла и кварца. При этом качество резки высокое, но со стороны входа и выхода луча кромки слегка оплавлены.

Одним из первых применений лазеров в ювелирной отрасли были операции ремонта различных изделий с помощью лазерной сварки. На рисунке 7.20 показан один из примеров – цепочки. Действительно, всем известно и с успехом применяется оборудование для производства цепочек, особенно в итальянских фирмах. Особенностью этого процесса является его двух-стадийность: сначала формируется цепочка, потом производится ее пайка традиционными методами. Лазеры позволяют производить сварку звена цепи непосредственно при его формировании на одной технологической операции и одном и том же оборудовании. Впервые такая технология была разработана для сварки золотых цепочек итальянской фирмой *Laservall*.

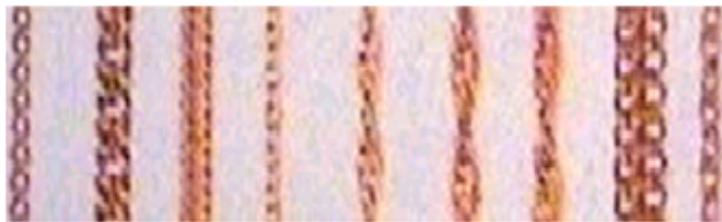


Рис. 7.20. Образцы свариваемых цепочек

### 7.5.2. Лазерная сварка

Пожалуй, наиболее широкое применение лазерная сварка нашла в производстве изделий электронной техники, так как позволяет сваривать тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден); проводить микролокальную сварку ( $\sim 10$  мкм); обрабатывать короткими импульсами ( $\sim 10^{-2}$ – $10^{-3}$  с), что исключает нежелательные структурные изменения в материалах из-за подавления диффузных процессов; вести сварку в любой атмосфере, в труднодоступных местах, бесконтактно и без загрязнений; соединять материалы с различными теплофизическими и механическими свойствами. Процесс сварки лазером позволяет проводить операции вблизи от термочувствительных элементов.

Лазерная сварка является энергоемким процессом, поскольку требует плавления материала. Основная особенность изучения физики плавления связана с тем, что при плавлении большинства металлов их электропроводность скачком уменьшается в 2–3 раза, что влечет за собой изменение теплопроводности и отражательной способности и тем самым приводит к новому режиму нагрева, характеризующемуся дополнительной затратой тепла на плавление.

В этом случае очень часто материалы прибегают к решениям, позволяющим резко увеличить производительность лазерной сварки за счет использования дополнительной энергии или специальной реактивной среды. На рисунке 7.21 показана схема лазерно-дугового сварочного аппарата с поддувом кислорода. При такой комбинации глубина проплавления будет больше суммы проплавления лазера и дуги, взятых по отдельности.

Важным моментом процесса сварки с помощью лазера является возможность получения максимальной глубины проплавления  $z_n$  без выплеска, что нужно для повышения надежности. Поскольку выплеск связан с процессом испарения, то это означает, что температура поверхности расплава не должна превышать  $T_k$ . Величину  $z_n$  можно определить из выражения:

$$z_n = d_r / 2 \times (T_k / T_n - T_n / T_k).$$

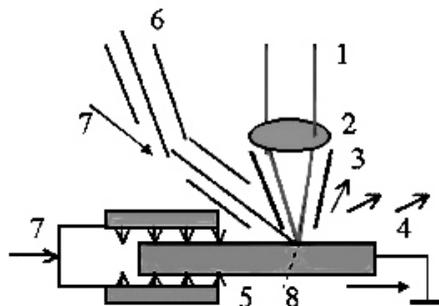


Рис. 7.21. Схема лазерно-дугового сварочного аппарата:

- 1 – луч лазера; 2 – линза; 3 – сопло; 4 – испаряемый материал; 5 – деталь;  
6 – механизм подачи присадочной проволоки; 7 – механизм перемещения изделия

Максимальное проплавление можно получить, увеличивая длительность импульса  $t_i$  или время облучения до величины  $t \gg 10 d_r^2 / c_3$  с одновременным уменьшением плотности мощности излучения.  $I_0 = c_3 (T_k / d_r)$ . Дополнительные возможности увеличения глубины проплавления лежат в области технических решений формирования импульсов специальной формы. Энергетически вид сварки, связанный с глубоким кинжальным проплавлением реализуется в интервале значений  $I_{01}$  и  $I_{02}$ . За время действия лазерного излучения одновременно идут два процесса: образование глубокого канала кинжала, облегчающего доступ излучения вглубь материала, и поглощение излучения продуктами эрозии (частицы пара) из зоны проплава.

Исходя из этого представления, можно легко уяснить, что использование импульсного режима работы лазера уменьшает поглощение света и тем самым увеличивает глубину проплавления (примерно в 4–10 раз) по сравнению с непрерывным режимом при одинаковой средней мощности. Глубина проплавления зависит также от мощности источника и длительности импульса.

### ***7.5.3. Лазерная пайка***

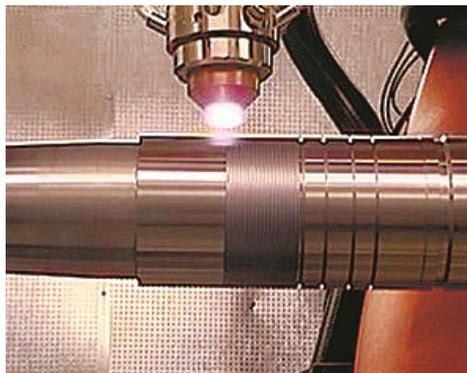
Другой технологической операцией, также связанной с процессом плавления, является лазерная пайка, которую, подобно сварке, можно проводить в труднодоступных местах, закрытых объемах, используя все замечательные свойства лазерного излучения. Чаще всего для этой операции используются твердотельные лазеры с  $l = 1,06$  мкм, а тип этой операции является, пожалуй, самым массовым видом лазерных технологий при производстве изделий электронной техники.

Основными преимуществами лазерной пайки являются следующие возможности: практически мгновенная скорость нагрева; точное дозирование энергии в процессе пайки; прецизионность позиционирования зон обработки и т.д.

### ***7.5.4. Лазерная термообработка***

Физическое содержание процесса термообработки заключается в изменении структурных свойств материалов под воздействием нагрева (в отличие от сварки – плавления и резки – испарения). Принципиально лазерная термообработка не отличается от обычной, но имеет свои особенности. Использование лазера позволяет резко уменьшить глубину обрабатываемого слоя, управлять его величиной, проводить локальные структурные преобразования, придавать обрабатываемым участкам особые свойства, проводить профилированную термообработку и т.д. Лазерное действие на материал, как правило, многофакторный процесс, а лазерная термообработка подразумевает получение различных результатов: закалки, отжига, отпуска, легирования, упрочнения, кристаллизации, аморфизации и других процессов.

Так, например (см. рис. 7.22), участок поверхности металла нагревают лазером до критической температуры, при этом тепло проникает вглубь изделия благодаря его теплопроводности. Как только действие лазера прекращается, происходит быстрое остывание изделия за счет проникновения тепла вовнутрь, где начинают формироваться закалочные структуры, препятствующие быстрому износу при будущей эксплуатации изделия.



**Рис. 7.22. Реализация процесса лазерной закалки**

Отжиг – это такой вид термической обработки, при котором сначала осуществляют нагрев изделия до определённой температуры, затем выдерживают в течение определенного времени при этой температуре, далее медленно охлаждают до комнатной температуры. Так снижают твердость металла, облегчая дальнейшую механическую его обработку, при этом улучшается микроструктура и достигается большая однородность металла, снимаются внутренние напряжения. Отжиг лазером позволяет обрабатывать таким образом мелкие детали из металлов.

Отпуск проводят с целью получения более высокой пластичности и снижения хрупкости материала при сохранении приемлемого уровня его прочности в местах соединения деталей. Для этого изделие подвергается нагреву лазером до температуры от 150–260°С до 370–650°С с последующим медленным охлаждением (остыванием).

### ***7.5.5. Лазерное легирование и наплавка***

Легирование поверхности металла лазером повышает его микротвердость и износостойкость.

Метод лазерной наплавки позволяет наносить износостойкие поверхностные слои. Применяется в восстановлении высокоточных деталей, используемых в условиях повышенного износа, например таких как клапаны ДВС и другие детали двигателей. Данный метод по качеству превосходит напыление, поскольку здесь формируется монолитный слой связанный с основой.

Скоростная аморфизация подготовленной поверхности сплава сканирующим лучом или коротким импульсом достигается благодаря быстрому теплоотводу, при котором происходит как бы замораживание расплава, образуется подобие металлического стекла с высокой твердостью, стойкостью к коррозии, улучшением магнитных характеристик. Материал предварительного покрытия подбирается так, чтобы вместе с основным материалом образовывать состав, склонный к аморфизации под действием лазера.

### *7.5.6. Гравировка и маркировка*

Практически везде в промышленности на сегодняшний день применяются именно лазерная гравировка и маркировка: нанесение рисунков, надписей, кодирование образцов, таблички, шильды, художественная отделка, сувениры, ювелирные изделия, миниатюрные надписи на самых мелких и хрупких изделиях, – стали возможны только благодаря автоматизированной лазерной технологии.

Одним из наиболее интересных методов обработки драгоценных металлов является маркировка и гравировка. Современные лазеры, оснащенные компьютерным управлением, позволяют наносить на металл методом лазерной маркировки и гравировки (модификации поверхности под воздействием лазерного излучения) практически любую графическую информацию – рисунки, надписи, вензеля, логотипы. Причем изображение можно наносить как в растровом, так и в контурном изображении. Современное оборудование позволяет перемещать лазерный луч со скоростью более двух метров в минуту и обеспечивать графическое разрешение на металле до 10...15 линий на миллиметр. В такой технике возможно изготовление с низкой себестоимостью различных подвесок, заколок, и других ювелирных изделий со своеобразной лазерной графикой. Также интересным применением лазерной технологии гравировки является нанесение лазером различных логотипов, вензелей владельцев, товарных марок и знаков на элементы столовой посуды, как из драгоценных металлов, так и недорогих металлов, например, для обозначения «нерж.» на клинках ножей.

Клеймение является разновидностью лазерной маркировки, когда изображение формируется на металле в результате проецирования предварительно созданного рисунка лазерным лучом. Такой метод позволяет легко получать изображения небольших размеров на металле и применяется для постановки штифтов предприятия-изготовителя изделия и пробирных клейм. Высокое разрешение позволяет получать изображения с высокой степенью защиты от воспроизведения (подделки) и может применяться для постановки пробирных клейм.

Клеймо на изделии одновременно является знаком его качества. Технология нанесения клейма лазером не приводит к потери качества изделий, не требует операций заправки клейма, обладает высокой производительностью и эргономичностью. Особенно эффективно применение лазерного клеймения на легко-весные и тонкостенные изделия из драгоценных металлов.

### 7.5.7. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий

Кратко описать принцип работы установки для аддитивного производства с помощью лазерного излучения можно следующим образом. Устройством для нанесения и выравнивания слоя порошка снимает слой порошка с питателя и равномерным слоем распределяет его по поверхности подложки. После чего лазерный луч сканирует поверхность данного слоя порошка и путем оплавления или спекания формирует изделие. По окончании сканирования порошкового слоя платформа с изготавливаемым изделием опускается на толщину наносимого слоя, а платформа с порошком поднимается, и процесс нанесения слоя порошка и сканирования повторяется. После завершения процесса платформа с изделием поднимается и очищается от неиспользованного порошка (рис. 7.23).

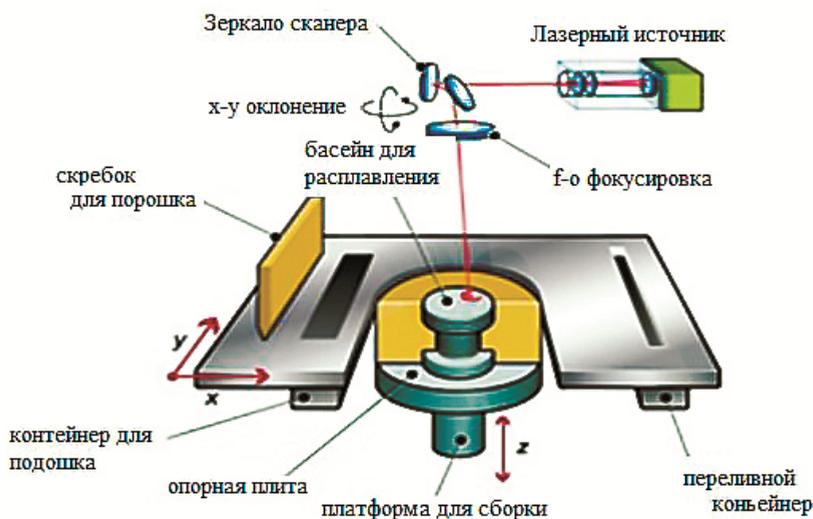


Рис. 7.23. Установка лазерного аддитивного производства металлических изделий

Одной из основных частей в установках аддитивного производства является лазерная система, в которой используются  $\text{CO}_2$ , Nd:YAG, иттербий волоконный или дисковый лазеры. Установлено, что использование лазеров с длиной волны 1–1,1 мкм для нагрева металлов и карбидов предпочтительнее, поскольку они на 25–65% лучше поглощают генерируемое лазером излучение. В тоже время, использование  $\text{CO}_2$  лазера с длиной волны 10,64 мкм наиболее лучше подходит для таких материалов, как полимеры и оксидная керамика. Более высокая абсорбционная способность позволяет увеличить глубину про-

плавления и в более широких пределах варьировать параметрами процесса. Обычно лазеры, используемые в аддитивном производстве, работают в непрерывном режиме. По сравнению с ними применение лазеров работающих в импульсном режиме и в модулированной добротности за счет их большой энергии импульса и короткой продолжительности импульса (наносекунды) даёт возможность улучшить прочность связи между слоями и уменьшить зону термического воздействия. В заключение можно отметить, что характеристики используемых лазерных систем лежат в таких пределах: мощность лазера – 50–500 Вт, скорость сканирования до 2 м/с, скорость позиционирования до 7 м/с, диаметр фокусированного пятна – 35–400 мкм.

Помимо лазера как источник нагрева порошка может быть использован электронно-лучевой нагрев. Этот вариант фирма Arcam предложила и реализовала в своих установках в 1997 г. Установка с электронно-лучевой пушкой характеризуется отсутствием подвижных частей, так как электронный луч фокусируется и направляется с помощью магнитного поля и дефлекторов, а создание в камере вакуума положительно сказывается на качестве изделий.

Одним из важных условий при аддитивном производстве является создание защитной среды, предотвращающей окисление порошка. Для выполнения этого условия используют аргон или азот. Однако применение азота как защитного газа ограничено, что связано с возможностью образования нитридов (например, AlN, TiN при изготовлении изделий из алюминиевых и титановых сплавов), которые приводят к понижению пластичности материала.

Методы лазерного аддитивного производства по особенностям процесса уплотнения материала можно разделить на селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering (SLS)), не прямое лазерное спекание металлов (Indirect Metal Laser Sintering (IMLS)), прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering (DMLS)) и селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting (SLM)). В первом варианте уплотнение слоя порошка происходит за счет твердофазного спекания. Во втором – за счет пропитки связкой пористого каркаса, ранее сформированного лазерным излучением. В основе прямого лазерного спекания металлов лежит уплотнение по механизму жидкофазного спекания за счет плавления легкоплавкого компонента в порошковой смеси. В последнем варианте уплотнение происходит за счет полного плавления и растекания расплава. Стоит отметить, что эта классификация не является универсальной, поскольку в одном типе процесса аддитивного производства могут проявляться механизмы уплотнения, которые характерны для других процессов. Например, при DMLS и SLM может наблюдаться твердофазное спекание, которое имеет место при SLS, тогда как при SLM может происходить жидкофазное спекание, которое более характерно для DMLS.

## Контрольные вопросы и задания

1. Какие физические процессы лежат в основе работы лазера?
2. Каково назначение и принцип действия лазера?
3. Какие особые свойства лазерного луча вам известны?
4. Из каких систем и устройств состоит лазерная установка?
5. Какие установки с лазерами вы знаете? Какие из свойств лазеров в них используются?
6. В чем особенности лазерной резки?
7. Расскажите о лазерной сварке.
8. Какие типы лазеров вы знаете? В чем их особенности?
9. Расскажите об использовании лазеров в шоу индустрии.
10. Назовите примеры использования лазеров в технике.
11. Для каких целей используется лазер в науке?
12. Как используется лазер в военных целях?
13. Назовите примеры использования лазеров в медицине.
14. Как работает лазерный локатор?
15. Каким образом измеряют расстояние с помощью лазера?
16. Что вам известно о термообработке с помощью лазеров?
17. Использование лазеров в аддитивных технологиях.

## Список рекомендуемой литературы к главе 7

1. Брэгг, У. Мир света. Мир звука: пер. с англ. под ред. И.В. Обреимова / У. Брэгг. – М.: Наука, 1967.
2. Басов, Н.Г. Световое чудо века / Н.Г. Басов. – М.: Педагогика, 1981.
3. Бертолотти, М. История лазера / М. Бертолотти. – Долгопрудный.: Интеллект, 2011.
4. Пихтин, А.Н. Физические основы квантовой электроники / А.Н. Пихтин. – М.: Высшая школа, 1983.
5. Квантовая электроника: Маленькая энциклопедия / под ред. М.Е. Жаботинского. – М.: Сов. энциклопедия, 1969.
6. Справочник по лазерам / под ред. А.М. Прохорова. – М.: Советское радио, 1978.
7. Федоров, Б.Ф. Лазеры. Основы устройства и применение / Б.Ф. Федоров. – М.: ДОСААФ, 1988.
8. Орлов, В.А. Лазеры в военной технике / В.А. Орлов. – М.: Воениздат, 1976.
9. Шахно, Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине / Е.А. Шахно. – СПб: НИУ ИТМО, 2012.

*Учебное издание*

**Кувалдин Александр Борисович**  
**Погребиский Михаил Яковлевич**  
**Федин Максим Андреевич**  
**Нехамин Сергей Маркович**  
**Кругянский Михаил Миронович**  
**Чурсин Андрей Юлианович**

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ

Учебник

Редактор Т.А. Феоктистова  
Компьютерная верстка А.В. Худяковой

---

Подписано в печать	10.09.23.	Печать офсетная	Формат 70x100 1/16
Печ. л. 40,0	Тираж 120 экз.	Изд. № 23уК-070	Заказ №

---

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.  
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.