

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

А.Н. Тугов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Учебное пособие

по курсу
«Современные энергетические технологии»
для студентов, обучающихся по направлениям
«Электроэнергетика и электротехника»
«Энергетическое машиностроение»

Москва
Издательство МЭИ
2021

УДК 620
ББК 31.6
Т 815

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре моделирования и проектирования
энергетических установок

Рецензенты: П.В. Росляков, докт. техн. наук, проф. НИУ «МЭИ»;
Г.А. Рябов, докт. техн. наук, зав. лаб. спецкотлов
ОАО «ВТИ»

Тугов, А.Н.

Т 815 Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов: учеб.
пособие / А.Н. Тугов. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 196 с.

ISBN 978-5-7046-2375-5

С позиции энергетической целесообразности и экологической безопасности для окружающей среды рассматриваются варианты использования твердых коммунальных отходов в качестве вторичных энергетических ресурсов. Приводятся методические указания по оценке энергоэффективности, расчету материального и теплового балансов тепловых электростанций, сжигающих отходы. Показаны перспективы использования таких ТЭС в качестве возобновляемого источника энергии в малой (распределенной) энергетике РФ.

Для студентов, обучающихся по направлениям «Электроэнергетика и электротехника» магистерской программы «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии» и «Энергетическое машиностроение» магистерской программы «Энергетические установки на органическом и ядерном топливе».

**УДК 620
ББК 31.6**

ISBN 978-5-7046-2375-5

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	6
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ, СОСТАВ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТКО	10
1.1. Факторы, влияющие на рост образования ТКО. Нормы накопления	10
1.2. Компонентный (морфологический) состав ТКО. Методы его определения	13
1.3. Фракционный состав.....	18
1.4. Особые свойства.....	20
1.5. Теплотехнические характеристики	21
1.6. Элементный состав	27
1.7. Химический состав минеральной части.....	29
1.8. Оценка энергетического потенциала ТКО в России.....	30
2. ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТКО В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ.....	32
2.1. Энергетическое использование свалочного газа (биогаза захоро- нений ТКО).....	33
2.1.1. Состав и свойства биогаза захоронений	33
2.1.2. Добыча биогаза на полигонах	35
2.1.3. Утилизация биогаза.....	41
2.1.4. Существующее положение и перспективы энергетического использования биогаза захоронений	42
2.2. Изготовление топлива из ТКО для последующего сжигания в энергетических котлах и в цементных печах	47
2.2.1. Основные технологии получения топлива из ТКО.....	47
2.2.2. Сжигание топлива из отходов в энергетических котлах и це- ментных печах.....	53
2.2.3. Перспективы использования топлива из ТКО в энергетике и промышленности.....	55
2.3. Термическая переработка ТКО с выработкой тепловой и элект- рической энергии.....	58
2.3.1. Существующая ситуация в мире.....	58
2.3.2. Процессы в основе технологий термической переработки ТКО.....	60
2.3.3. Структура современного предприятия для термической пере- работки ТКО.....	61
2.3.4. Описание типовой технологии термической переработки ТКО с отпуском энергии потребителю.....	64

3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ. НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	69
3.1. Слоевое сжигание на колосниковой решетке.....	69
3.1.1. Общие сведения о процессе сжигания в слоевых топках.....	69
3.1.2. Конструкции колосниковых решеток.....	74
3.1.3. Фирмы-поставщики и технические характеристики современных колосниковых решеток для сжигания ТКО.....	80
3.1.4. Конфигурация топчного устройства, компоновка горелок и система обеспечения воздухом.....	86
3.1.5. Технические параметры, обеспечивающие оптимальные условия работы слоевых топок с механическими решетками ..	89
3.2. Сжигание отходов в кипящем слое	92
3.2.1. Основные характеристики кипящего слоя и процессы, протекающие в топках с кипящим слоем	92
3.2.2. Топки для сжигания отходов в пузырьковом кипящем слое.....	94
3.2.3. Котлы для сжигания ТКО в циркулирующем кипящем слое.....	95
3.2.4. Установки для переработки ТКО в топках с вихревым кипящим слоем	98
3.3. Термическая переработка отходов с использованием процессов газификации и пиролиза.....	102
3.3.1. Общие сведения о процессах.....	102
3.3.2. Комбинированные технологии с использованием процессов газификации и пиролиза	107
3.4. Другие методы термической переработки ТКО.....	112
3.4.1. Трубчатые (барабанные) печи	112
3.4.2. Сжигание в металлургических печах.....	114
3.4.3. Технологии с использованием плазмотронов	114
3.5. Наилучшие доступные технологии термической переработки отходов	116
4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТКО НА ТЭС.....	120
4.1. Котлы для утилизации теплоты газообразных продуктов сгорания ТКО	120
4.2. Метод оценки тепловой эффективности котлов для сжигания ТКО.....	124
4.3. Основы расчета материального и теплового балансов процесса термической переработки с генерацией пара	126
4.3.1. Методика расчета.....	127
4.3.2. Принимаемые допущения.....	130
4.3.3. Результаты балансовых расчетов.....	131

4.4. Варианты энергетической утилизации генерируемого в процессе термической переработки ТКО пара.....	132
4.5. Оценка энергоэффективности ТЭС на ТКО	136
4.6. Пути повышения энергоэффективности ТЭС на ТКО.....	141
5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ ТЭС, СЖИГАЮЩЕЙ ТКО, НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ. ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ТЭС ПРИРОДО-ОХРАННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ	145
5.1. Нормативные показатели и современные требования к очистке дымовых газов для установок, сжигающих ТКО	145
5.2. Краткий обзор существующих методов и технологий очистки газообразных продуктов сгорания ТКО от вредных выбросов.....	147
5.2.1. Очистка дымовых газов от твердых частиц и «кислых» газов.....	147
5.2.2. Технологии снижения выбросов оксидов азота.....	157
5.2.3. Мероприятия по снижению выбросов ПХДД/ПХДФ	161
5.3. Технические решения, делающие современную ТЭС на ТКО экологически безопасным предприятием	163
5.4. Свойства твердых остатков, образующихся при термической переработке ТКО, и рекомендации по их дальнейшей утилизации..	166
5.4.1. Характеристика твердых остатков	166
5.4.2. Утилизация золошлаковых остатков	169
5.4.3. Переработка продуктов газоочистки	171
6. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЭС НА ТКО. ПУТИ СНИЖЕНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ	173
6.1. Основные статьи затрат и доходов на ТЭС, сжигающих ТКО	173
6.2. Оценка влияния вида отпускаемой потребителю энергии на экономические показатели ТЭС, сжигающей ТКО	175
6.3. Условия эффективной работы ТЭС на ТКО	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	183
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	186
ПРИЛОЖЕНИЕ.	189

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКХ	–	ФГУП «Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова»;
АСУ ТП	–	автоматизированная система управления технологическим процессом;
ВИЭ	–	возобновляемый источник энергии;
ВКС	–	вихревой кипящий слой;
ВКР	–	валковая колосниковая решетка;
ВКУ	–	воздушно-конденсационная установка;
ГРП	–	газо-распределительный пункт;
ЗШО	–	золошлаковые остатки;
КПД	–	коэффициент полезного действия;
КР	–	колосниковая решетка;
КУ	–	котел-утилизатор;
НДТ	–	наилучшие доступные технологии;
ОПКР	–	обратно переталкивающая колосниковая решетка;
ПГУ	–	парогазовая установка;
ПДК	–	предельная допустимая концентрация;
ПКР	–	переталкивающая колосниковая решетка;
П.п.п.	–	потеря массы при прокаливании;
ПХДД	–	полихлорированные дибензодиоксины;
ПХДФ	–	полихлорированные дибензофураны;
СЗ	–	спецзавод;
СКВ	–	система каталитического восстановления оксидов азота;
СНКВ	–	система некаталитического восстановления оксидов азота;
ТКО	–	твердые коммунальные отходы;
ТКС	–	топка с кипящим слоем;
ТЛ	–	технологическая линия;
ТЭС на ТКО	–	тепловая электростанция на ТКО;
ЦКС	–	циркулирующий кипящий слой;
EfW	–	Energy from waste;
ВМТ	–	Biological Mechanical Treatment;
МВТ	–	Mechanical Biological Treatment;
RDF	–	Refuse Derived Fuel;
WTE	–	Waste-to-Energy Plant.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы энергетической утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО). В соответствии с Федеральным законом РФ от 27 декабря 2019 г. № 450-ФЗ под энергетической утилизацией понимается использование ТКО в качестве возобновляемого источника энергии и вторичных энергетических ресурсов в энергетике и промышленности.

Основное внимание в пособии уделено преобразованию энергопотенциала отходов в тепловую и электрическую энергию на ТЭС, которое должно производиться с максимальной энергоэффективностью и минимальным воздействием на окружающую среду.

В нашей стране исторически сложилось так, что предприятия для термической переработки ТКО с отпуском потребителям утилизируемой при сжигании энергии (в основном в виде тепловой энергии) находились в ведении коммунальных служб. Основная цель таких предприятий заключалась в санитарной очистке городов от образующихся отходов путем их огневого обезвреживания (сжигания). Вопросы энергоэффективности имели второстепенное значение. В этой связи, электрический КПД на немногочисленных действующих российских предприятиях (сейчас действующих всего два) находится на уровне 10–15%, а на некоторых – выделяемая в результате сжигания энергия вообще не утилизируется.

Автор надеется, что изложенный в учебном пособии материал позволит изменить в лучшую сторону отношение к термической переработке ТКО, которая сейчас во всем мире, а теперь уже и в России, рассматривается не как простое огневое обезвреживание, а как экологически безопасная энергетическая утилизация.

Большая часть материалов, включенных в эту книгу, получены автором на действующих российских объектах и по результатам анализа работы зарубежных профильных предприятий [1].

Учебник ориентирован на магистров высших учебных заведений энергетического профиля и может быть полезен специалистам в области проектирования и эксплуатации энергоустановок, основным топливом которых являются ТКО.

ВВЕДЕНИЕ

Твердые коммунальные отходы по теплоте сгорания сопоставимо с торфом и некоторыми марками бурых углей; образуется в местах, где энергия наиболее востребована, т.е. в крупных городах, и имеет гарантированное предсказуемое возобновление, пока существует человечество. Именно поэтому энергетическая утилизация ТКО находит все более широкое распространение в мире.

Как вторичные энергетические ресурсы ТКО могут быть использованы в качестве альтернативного топлива в цементных печах (после их тщательной подготовки). В уже имеющихся местах захоронения отходов можно извлекать биогаз, который, после обезвоживания и очистки, вполне пригоден для сжигания в энергоустановках. Но все же основным способом энергетической утилизации ТКО является их термическая переработка на специальных предприятиях с отпуском потребителю тепловой и электроэнергии. По существу эти предприятия являются тепловыми электростанциями, на которых основным топливом являются ТКО – ТЭС на ТКО (за рубежом – Waste-to-Energy Plant (WTE) или Energy from waste (EfW)).

В настоящее время четыре десятка стран официально считают ТЭС на ТКО перспективным возобновляемым источником энергии (ВИЭ). В отличие от других ВИЭ работа ТЭС на ТКО не зависит от природных условий, географического расположения и в результате ее эксплуатации решается важная социальная задача – санитарная очистка населенных пунктов от отходов.

С недавних пор в России ТЭС на ТКО также рассматривают как один из видов ВИЭ. Правительство Российской Федерации утвердило постановление от 28 февраля 2017 года № 240 «Об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации по вопросам использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности», в котором генерирующие объекты, функционирующие на основе использования отходов производства и потребления, считаются возобновляемыми источниками энергии. Распоряжением от 28 февраля 2017 года №355–р определено строительство объектов ВИЭ на основе ТКО общей электрической мощностью 280 МВт в Московской области и один объект электрической мощностью 55 МВт в республике Татарстан. С 01 января 2020 вступил в силу Федеральный закон РФ от 27 декабря 2019 г. № 450–ФЗ, в котором использование ТКО в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) трактуется как энергетическая утилизация.

Сейчас в мире суммарная электрическая мощность действующих ТЭС на ТКО уже составляет более 15 ГВт; а объем отпускаемой ими электроэнергии превышает 53 млрд кВт·ч в год. С принятием указанных документов открываются перспективы широкомасштабного строительства новых ТЭС на ТКО и в нашей стране.

Основная цель настоящего пособия – помочь адекватно оценить ситуацию в области энергетической утилизации ТКО и показать основные тенденции в этой области.

Учебное пособие содержит 6 разделов, каждая из которых заканчивается контрольными вопросами.

В первом разделе ТКО характеризуются как низкосортное многокомпонентное топливо и выполнена оценка энергепотенциала образующихся в РФ этих отходов.

Во втором разделе рассматриваются основные варианты использования ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов в промышленности и энергетике, а также вопросы получения биогаза на полигонах захоронения ТКО для его последующей утилизации.

В третьем разделе представлен анализ основных методов и технологий термической переработки ТКО. Обосновывается выбор в качестве наилучшей доступной технологии для энергетической утилизации ТКО – слоевого сжигания на механических колосниковых решетках.

В четвертом разделе анализируются различные возможные схемы утилизации выделяемой при сжигании ТКО теплоты. Для типовой ТЭС приводятся основы расчета материального и теплового балансов процесса энергетической утилизации, а также методика оценки широко используемого за рубежом критериального параметра – энергоэффективности. Рассматриваются пути его повышения.

В пятом разделе представлен краткий обзор существующих методов и технологий очистки газообразных продуктов сгорания ТКО от вредных выбросов, делающих современную ТЭС на ТКО экологически безопасным предприятием. Анализируются свойства твердых остатков, образующихся в процессе термической переработки ТКО. Даны рекомендации по их дальнейшему использованию.

В шестом разделе отражены экономические аспекты создания и функционирования ТЭС на ТКО и показаны пути снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

В заключении анализируются перспективы использования ТЭС на ТКО в качестве возобновляемого источника энергии в малой (распределенной) энергетике РФ.

Термины и определения в области управления отходами, используемые в пособии, приведены в Приложении.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ, СОСТАВ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТКО

1.1. Факторы, влияющие на рост образования ТКО. Нормы накопления

Твердые коммунальные отходы – это отходы потребления, образующиеся у населения, а также отходы производства и потребления, производимые предприятиями торговли и сервиса, учреждениями образования и культуры, организациями коммунального комплекса и другими юридическими лицами и индивидуальными предприятиями, осуществляющими свою хозяйственную деятельность на территории населенных пунктов, сходные по составу с ТКО.

С каждым годом количество образующихся во всем мире ТКО растет, и связано это как с ростом численности населения, так и с увеличением количества отходов, образующихся на расчетную единицу (человека – для жилищного фонда; одно место в гостинице; 1 м² торговой площади для магазинов и складов и т.п.) в единицу времени (как правило, за год), так называемыми *нормами накопления*.

Нормы накопления в разных странах могут различаться значительно. Например в отдельных государствах – членах ЕС, они составляют:

- более 700 кг – в Дании, Ирландии, на Кипре и в Люксембурге;
- 600–700 кг – в Германии, Эстонии, Испании, Франции, Италии, Финляндии Швеции и Великобритании;
- 500–600 кг – в Бельгии, Болгарии, Греции, Литве, Венгрии, Португалии и Словении;
- менее 400 кг – в Чехии, Латвии, Польше, Румынии и Словакии.

В среднем в странах ЕС образуется более 500 кг коммунальных отходов на 1 человека.

Нормы накопления зависят от благосостояния населения страны, и с улучшением качества жизни этот показатель увеличивается. Именно поэтому наибольший темп роста норм накопления сейчас наблюдается в развивающихся странах.

Прогноз образования отходов до 2050 г. в разных регионах мира показан на рис. 1.1. Видно, что если в Европе в 2016 г. количество отходов составляло 392 млн т в год, к 2030 г. достигнет 441 млн т в год, т.е. увеличится на 12%, а к 2050 г. возрастет лишь на 25%, то в странах Азии и

Африки, в которых наблюдается не только рост численности населения, но и его благосостояние, темпы образования отходов гораздо больше – к 2030 г. прогнозируется увеличение их объемов уже на 40–45%, а к 2050 г. – в 2,5 раза.

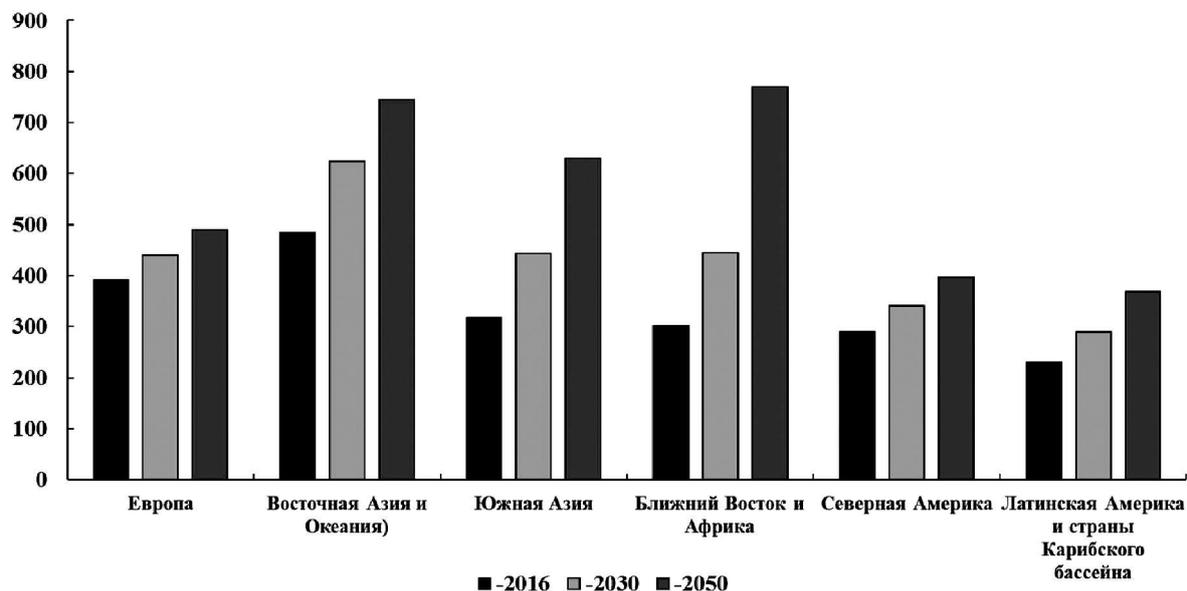


Рис. 1.1. Прогноз образования отходов в регионах мира, млн т в год¹

На нормы накопления оказывает существенное влияние менталитет населения. В каждой конкретной стране формируется своя позиция в области обращения с отходами. Например для стран ЕС, основы в области обращения с отходами определены в «Стратегии Европейского Сообщества в области управления с отходами», впервые опубликованной в 1989 г. в коммюнике Комиссии ЕС, и законодательно закреплены в Рамочной Директиве 2008/98/ЕС «Об отходах» [2]. В соответствии с положениями этих правовых актов определены базовые принципы европейской политики в области обращения с отходами, в том числе, иерархия приоритетов, где в качестве предпочтительного варианта рассматривается предотвращение образования отходов, т.е. снижение нормы накопления. Отсюда, как видно из рис. 1.1, темп увеличения количества отходов в Европе не такой интенсивный, как, например, в Африке и обусловлен, скорее всего, только ростом населения.

¹ – Рынок производства энергии из отходов. Его состояние и прогноз развития. — [Электрон. ресурс] Режим доступа: <https://zen.yandex.ru/media/w2e/energii-iz-othodov-v-mire-5d91f4bee6cb9b00ad469efd>

На нормы накопления влияют также следующие факторы:

- климатическая зона;
- степень благоустройства жилищного фонда (наличие мусоропроводов, газа, водопровода, канализации, системы отопления);
- этажность домостроений;
- уровень развития местного производства легкой, пищевой и сопутствующих отраслей;
- нормативная база по применению материалов (в том числе упаковочных) в сфере потребления.

Для России ориентировочные нормы накопления ТКО приведены в табл. 1.1, которая составлена по данным [3].

Таблица 1.1

**Ориентировочные нормы накопления ТКО в жилом фонде
и в отдельно стоящих объектах общественного назначения (для РФ)**

Объект образования отходов	Расчетная единица	Норма накопления, кг/год	Плотность, кг/м³
Благоустроенные жилые дома	на 1 человека	200–280	200–220
То же для городов с населением более 100 тыс. чел.		280–300*	190–210
НИИ, проектные институты и конструкторские бюро, административные и другие учреждения, офисы	на 1 сотрудника	130–160	110
Сбербанки, банки, отделения связи		75–110	110–120
Школа, техникум, институт	на 1 учащегося	22–24	200
Продовольственный магазин, рынок	на 1 м ² торговой площади	345–365	200–300
Промтоварный магазин		135–280	180–200
Павильоны, палатки, лотки		570–870	160–170
Предприятия общественного питания	на 1 место	215	190
Гостиница, общежитие		120–200	170
Детские сады, ясли		80–95	200
Театр, кинотеатр		27–30	150
Санатории, пансионаты, дома отдыха		170–250	170
Вокзалы, автовокзалы, аэропорты	на 1 пассажира	125–145	180
Больница	на 1 койку	400	200
* по экспертным оценкам, эта величина для крупных городов колеблется от 300 кг/чел. до 650 кг/чел. в год			

Для укрупненных расчетов и планирования можно принять, что нормы накопления учреждений и предприятий общественного назначения в крупных городах составляют 30–50% от норм накопления жилых зданий (в Москве – до 60%).

Для крупных городов нормы накопления несколько выше, чем для средних и малых городов.

1.2. Компонентный (морфологический) состав ТКО. Методы его определения

С точки зрения теплотехники, твердые коммунальные отходы представляют собой многокомпонентную гетерогенную смесь топлив с различным элементным составом, теплотой сгорания и минеральной частью, а также фракционным составом. Основные горючие компоненты этой смеси известны, это – пищевые и бумажные отходы, пластик, текстиль, кожа, древесина. ТКО могут также включать в себя различные отбросы, уличный смет, одежду, санитарные материалы, бутылки и стеклопосуду, фарфор и керамику, нефтяные отходы, масло и смазочные материалы, медицинские отходы, батарейки и аккумуляторы, зеркала и флуоресцентные трубки, бытовые и коммерческие химикаты, инфраструктурный лом, строительные и ремонтные материалы, металлы, и т.д. Некоторые из перечисленных компонентов опасны (такие как батарейки, медицинские отходы, зеркала, флуоресцентные лампы и т.д.) и поэтому необходимы специальные методы для их переработки.

Для того чтобы определить интегральные теплотехнические характеристики ТКО, надо знать, из каких компонентов состоят ТКО и в каких количествах, т.е. компонентный состав, который принято называть морфологическим. Морфологический состав – важнейшее свойство ТКО, определяющее их ресурсный потенциал и возможности дальнейшего использования.

На морфологический состав ТКО влияют различные факторы: климатическая зона, в которой находится населенный пункт, сезон (время года), уровень жизни и развитие местной промышленности, а также использование новых технологий в производстве продуктов потребления и доля импорта.

По принятой в жилищно-коммунальном хозяйстве методике определения морфологического состава, разработанной ФГУП «Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова» (методика АКХ), из отходов выделяют следующие компоненты: бумага, картон; пищевые от-

ходы; дерево; металл (черный, цветной); текстиль; кости; стекло; кожа; резина; камни; полимерные материалы; прочие (неклассифицируемые части); отсев (менее 15 мм) (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Ориентировочный морфологический состав ТКО, % по массе

Компонент	ТКО жилого фонда			ТКО общественных и торговых предприятий
	Климатические зоны РФ			
	средняя	южная	северная	
Пищевые отходы	24–30	30–35	24–30	13–16
Бумага, картон	38–42	32–34	36–38	45–52
Дерево	1–2	1–2	2–5	3–5
Черный металл	3–4	2–3	3–4	3–4
Цветной металл	1–2	1–2	1–2	1–4
Текстиль	1–5	3–5	4–6	3–5
Кости	1–2	1–2	1–2	1–2
Стекло	3–5	3–5	4–6	1–2
Кожа, резина	1,5–2	1,5–2	2–3	2–3
Камни, штукатурка	1,5–2	1,5–2	1–3	1–2
Пластмасса	5–6	5–6	5–6	8–12
Прочее	1–2	3–4	1–2	2–3
Отсев (менее 15 мм)	5–7	6–8	4–6	5–7

Из таблицы 1.2 видно, что наибольшая разница в процентном содержании компонентов ТКО наблюдается при сравнении морфологического состава различных климатических зон и отходов, собираемых с жилищного и нежилого секторов. ТКО общественных и торговых организаций характеризуются повышенным содержанием макулатуры, дерева, пластмасс и пониженным содержанием пищевых и растительных отходов.

Сезонные изменения состава ТКО связаны, в основном, с изменением содержания в них пищевых отходов с 20–25% весной до 40–55% осенью за счет увеличения употребления овощей и фруктов в рационе питания населения (особенно в городах южной климатической зоны). Зимой и осенью сокращается содержание мелкого отсева (уличного смета) с 20 до 7% в городах южной зоны и с 11 до 5% в средней зоне.

Состав ТКО крупных городов отличается от среднего по климатической зоне большим содержанием упаковочных материалов (бумага, пластик, стекло) и, соответственно, меньшим содержанием пищевых отходов (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Морфологический состав ТКО крупных городов

Компонент	Содержание, % масс.			
	Москва	Санкт-Петербург	Пермь	Екатеринбург
Пищевые отходы	17–19	20–22	9–11	18
Бумага, картон	17–20	21–23	21–23	19–20
Дерево	1	2	1	< 1
Черный металл	1–2	3	2	2–3
Цветной металл	< 1	< 1	< 1	< 1
Текстиль	1,6–2	3–5	4–5	11–12
Кости	—	—	—	—
Стекло	15–17	15–17	17–18	8–9
Кожа, резина	1	1–2	2	4
Камни, штукатурка	1	4–5	—	—
Пластмасса	13–15	15–19	15–16	22–25
Прочее	13	2–3	14–16	8
Отсев (менее 15 мм)	10–11	10	12–13	5

Нужно также отметить, что за последние 30–40 лет морфологический состав отходов претерпел существенные изменения, связанные с тем, что поменялась структура потребления товаров. В отходах все больше можно заметить преобладание таких компонентов, как пластмасса (полиэтилен, полипропилен, изделия из поливинилхлорида и др.), стекло. Помимо этого, в ТКО, редко можно увидеть кости и остатки угля. Состав ТКО стал разнообразней: появились новые упаковочные материалы и продукты потребления, различные виды полимеров и композиционных материалов. В таблице 1.4 представлены данные Пермского национального исследовательского политехнического университета по морфологическому составу из 42 компонентов.

Таблица 1.4

Расширенный морфологический состав ТКО крупных городов [4]

Наименование компонента	Состав, %	Наименование компонента	Состав, %
<i>Органические отходы</i>		<i>Металлы</i>	
пищевые отходы	21,9	алюминиевая банка	0,3
растительные отходы	1,6	жестяная банка	0,8
<i>Макулатура</i>		черный металлолом	0,3
картон крупный (гофрокартон)	1,9	цветной металлолом	0,2
картон мелкий	2,7	<i>Текстиль</i>	

Окончание табл. 1.4

Наименование компонента	Состав, %	Наименование компонента	Состав, %
офисная бумага	1,1	натуральный текстиль	1,6
газетная бумага	1,1	синтетический текстиль	1,6
книги и тетради в обложке	0,4	<i>Дерево</i>	
глянцевая бумага	0,5	дерево	1,3
прочая макулатура	5,2	<i>Комбинированные материалы</i>	
<i>Полимеры</i>		комбинированная упаковка (тетрапак)	0,8
пленка полиэтиленовая	6,7	электронные отходы (бытовые приборы)	0,3
пленка полипропиленовая	1,8	прочие комбинированные материалы	0,5
металлиз. и многослойная пленка	1,1	<i>Опасные материалы</i>	
ПЭТ-бутылка прозрачная	1,8	опасные материалы	0,7
ПЭТ-бутылка зеленая	0,4	<i>Инертные материалы</i>	
ПЭТ-бутылка синяя	0,3	строительные отходы	1,6
ПЭТ-бутылка темная	0,5	прочие инертные материалы	1,9
ПЭ-бутылки	1,0	<i>Прочие материалы</i>	
ПВХ	0,4	подгузники одноразовые	2,3
полимерная упаковка	2,1	кожа, резина, обувь	2,9
прочие полимеры	2,5	прочее	2,2
<i>Стекло</i>		<i>Отсев</i>	
стеклотара прозрачная	4,6	отсев	16,5
стеклотара зеленая и синяя	1,6	<i>Дополнительно</i>	
стеклотара темная	1,5	жидкости (вода)	0,3
прочее стекло	1,6	ИТОГО	100,0

Морфологический состав определяют путем отбора средней пробы с последующим разбором ее на компоненты. На полученные результаты влияют место сбора, время и т.д., поэтому для получения достоверных данных о компонентном составе ТКО огромное значение играет правильный отбор пробы или, другими словами, получение представительной (репрезентативной) средней пробы.

Основное требование к отбору проб заключается в том, чтобы их состав максимально соответствовал среднему составу всего количества исследуемых ТКО и чтобы при отборе влажность компонентов не изменялась.

В месте, отведенном для отбора первичной пробы, подготавливается бетонная площадка площадью не менее 50 м². Мусоровоз с ТКО взвешивают, после чего отходы разгружают на эту площадку по возможности

равномерно на 10 куч. Персонал перемешивает вилами кучки отходов и отбирает пробы в 4 порожние, предварительно взвешенные баки, вплоть до их заполнения. Каждый последующий отбор из одной и той же кучки производится с другого места, чем предыдущий. Это делается для усреднения отбираемой пробы. После наполнения баков остаток ТКО удаляется с площадки, наполненные баки взвешиваются, а их содержимое высыпается на свободное место площадки.

Для первичной пробы берется по 30–50 кг ТКО от каждого разгружаемого мусоровоза, всего 150–200 кг, и тщательно перемешивается. Тем самым первичная проба будет подготовлена для дальнейшей обработки. Средняя проба отбирается непосредственно после взятия первичной пробы. Чтобы средняя проба была представительной, используют прием «квартования», то есть последовательного деления первичной пробы на 4 части с отбрасыванием 3 из них. Средняя проба должна отбираться из различных частей (например, методом «конверта», то есть в пяти точках на поверхности, расположенных в вершинах воображаемого прямоугольника и в его центре) с тем, чтобы максимально точно отображать его состав.

Средняя проба взвешивается и разбирается на компоненты. Все отобранные фракции также взвешиваются в состоянии естественной влажности.

Часовой график отбора средних проб ТКО следует приспособить, по возможности, ко всем факторам, влияющим на изменчивость состава ТКО. Необходимо, чтобы определение количества и состава ТКО проводилось одновременно. Для получения репрезентативной пробы ТКО вся обследуемая область делится на зоны своза ТКО так, чтобы в течение всего временного интервала исследований систематически выбирались зоны своза одного типа. Минимальное количество анализов для крупных городов – 12 раз в год.

Для получения изменений состава ТКО в течение одной недели пробы отбирают по следующей схеме:

- 1-я неделя – понедельник;
- 2-я неделя – вторник;
- 3-я неделя – среда;
- 4-я неделя – четверг и т.д.

В те недели, когда отбираются пробы, необходимо тщательно записывать сведения о климатических условиях (температуру, давление и осадки).

1.3. Фракционный состав

Важным свойством ТКО, с учетом которого (в числе прочих показателей), например, выбирается технологическое оборудование для дальнейшей их утилизации, является *фракционный состав* отходов: процентное содержание массы компонентов ТКО, проходящей через сита с ячейками различного размера. В ряде технологий, например, при сжигании в вихревом кипящем слое фракционный состав ТКО определяет выбор оборудования на линии подготовки ТКО к сжиганию.

В таблице 1.5, в качестве примера, приведен усредненный морфологический и фракционный состав ТКО г. Москвы (в процентах от массы). В этой таблице не приведены данные о крупногабаритных отходах, т.е. не вмещающихся в стандартные (0,75 м³) контейнеры.

Таблица 1.5

Усредненный морфологический и фракционный состав ТКО г. Москвы, в % по массе [5]

Компонент	Размер фракций, мм						Суммарное значение
	> 250	150–250	80–150	50–80	15–50	< 15	
Пищевые отходы	0	0,14	3,56	4,14	4,62	5,54	18,00
Бумага, картон	5,71	7,27	3,85	1,84	0,75	0,28	19,70
Дерево	—	0,55	0,1	0,1	0,03	0,1	0,88
Металл черный	—	0	0,44	0,71	0,21	0,28	1,64
Металл цветной	0	0	0	0,17	0,01	0,01	0,19
Текстиль	0,34	0,73	0,43	0,05	0	0	1,55
Памперсы	0,71	1,65	0,35	0	—	—	2,71
Стекло	0	6,07	5,74	2,48	1,35	1,18	16,82
Кожа, резина	—	0,17	0,24	0,33	0,04	0,03	0,81
Камни и т.п.	0	0,18	0,3	0,45	0,04	0,01	0,98
Пластмасса	0,29	3,09	4,78	1,95	1,10	0,43	11,64
ПЭТФ	0,05	2,11	0,36	0,05	—	—	2,57
Прочее	0	0	3,1	3,59	2,31	3,10	12,10
Отсев	—	—	—	—	—	10,41	10,41
Итого	7,10	21,96	23,25	15,86	10,46	21,37	100,00

Из таблицы 1.5 следует, что размер основной массы отходов составляет менее 150 мм. Примерно 7% отходов приходится на фракции, превышающие 250 мм.

По наблюдениям специалистов АКХ фракционный состав компонентов ТКО за последние 5–10 лет практически не изменился.

Зная фракционный состав, можно сопоставить данные по морфологии, определенные по различным методикам, например, по методике АКХ (табл. 1.5) и методике ВТИ. Последняя, описание которой приводится в разд. 1.5, специально разработана для определения теплотехнических характеристик ТКО. Основное отличие этих методик заключается в том, что по методике АКХ из средней пробы на сите отделяется отсев менее 16 мм, который на фракции не разделяется, а по методике ВТИ, для упрощения последующей обработки пробы, отсев – это фракции, прошедшие через решетку размером 50×50 мм.

В таблице 1.6 помещены усредненные результаты определения морфологического состава ТКО г. Москвы, определенные по этим методикам.

Таблица 1.6

Морфологический состав ТКО г. Москвы, %

Компоненты, %	Результаты определения по методике АКХ ¹	Результаты определения по методике ВТИ
Пищевые отходы	18/7,84	5÷11
Бумажные отходы	19,7/18,67	16÷20
Дерево	0,88/0,75	
Металл	1,83/1,32	1,8÷4
Текстиль	4,26 ² /4,26 ²	2,5÷5,5
Кожа, резина	0,81/0,74	
Стекло	16,82/14,29	7÷15
Камни	0,98/0,93	(в основном стекло)
Пластмасса	14,21 ³ /12,68 ³	15÷26
Прочее	12,1/6,69	32÷38 ⁵
Отсев (мелкая фракция)	10,41 ⁴ /0	
1 – в числителе – общее содержание, в знаменателе – отходы более 50 мм; 2 – включая памперсы; 3 – суммарно с ПЭТФ; 4 – отсев < 15 мм; 5 – отсев < 50 мм		

Анализ таблицы 1.6 показывает удовлетворительное количественное совпадение практически по всем компонентам, включая общее количество отходов с размером фракций менее 50 мм, которое по методике АКХ (сумма разницы между числителем и знаменателем по всем компонентам второго столбца табл. 1.6) составляет 31,83% (количество отсева, определенного по методике ВТИ 32–38%).

1.4. Особые свойства

Особыми характеристиками ТКО являются их плотность, зависимость степени уплотнения от давления (компрессионная характеристика) и ряд других свойств.

Следует иметь в виду, что при определении этих свойств ТКО из их состава исключаются крупногабаритные отходы, такие как старая мебель, холодильники, стиральные машины, обрезки деревьев, крупная упаковочная тара и т.п.

Плотность ТКО благоустроенного жилищного фонда в весенне-летний сезон (в контейнерах) составляет 0,18–0,22 т/м³; в осенне-зимний – 0,20–0,25 т/м³; для различных городов среднегодовое значение плотности ТКО составляет 0,19–0,23 т/м³. Чем больше бумаги и различных пластмассовых упаковок, тем меньше плотность ТКО. С увеличением влажности плотность ТКО повышается. В будущем прогнозируется снижение плотности ТКО из-за увеличения количества различных упаковок.

Под воздействием внешнего давления плотность ТКО изменяется следующим образом. При повышении давления до 0,3–0,5 МПа происходит поломка различного рода упаковок, прессование бумаги и пленок, начинается выдавливание влаги. Плотность ТКО в зависимости от состава и влажности возрастает до 0,8–1,0 т/м³. Этот диапазон давления характерен для прессовых устройств, применяемых при сборе и удалении ТКО.

При повышении давления до 10–20 МПа происходит интенсивное выделение влаги (отжимается до 80–90% всей содержащейся в ТКО воды). Объем ТКО снижается еще в 2–2,5 раза при увеличении плотности в 1,3–1,7 раза. Спрессованный до такого состояния материал на некоторое время стабилизируется, так как содержащейся в материале влаги недостаточно для активной жизнедеятельности микроорганизмов, а доступ кислорода из-за высокой плотности затруднен.

ТКО обладают *связностью* за счет волокнистых фракций (текстиля, проволоки, пластмассовой пленки и т.п.) и сцеплением из-за наличия влажных липких компонентов. Это предопределяет следующие свойства ТКО:

- возможность налипания на металлическую стенку с углом наклона к горизонту до 65–70°;
- возможность сводообразования;
- вероятность непроеивания в неподвижную решетку с величиной прозоров 20–30 см.

ТКО обладают повышенной абразивностью – свойством истирать соприкасающиеся с ним поверхности при взаимном перемещении.

ТКО обладает слеживаемостью, т.е. при длительном хранении теряют сыпучесть и уплотняются (с возможностью выделения фильтрата) без всякого внешнего воздействия.

При длительном контакте с металлом ТКО оказывает корродирующее воздействие из-за наличия в фильтрате растворов агрессивно действующих солей и кислой средой ($\text{pH} = 5\text{--}6,5$).

1.5. Теплотехнические характеристики

Важными характеристиками ТКО, представляющими интерес с точки зрения их энергетической утилизации, являются теплотехнические свойства (влажность (W), зольность (A), содержание горючей массы, теплота сгорания (Q)) и химический (элементный) состав (содержание углерода (C), кислорода (O), водорода (H), азота (N), серы (S), хлора (Cl), тяжелых металлов и др.).

На рисунке 1.2 представлена диаграмма, показывающая распределение отдельных элементов в топливе, справедливая и для ТКО.

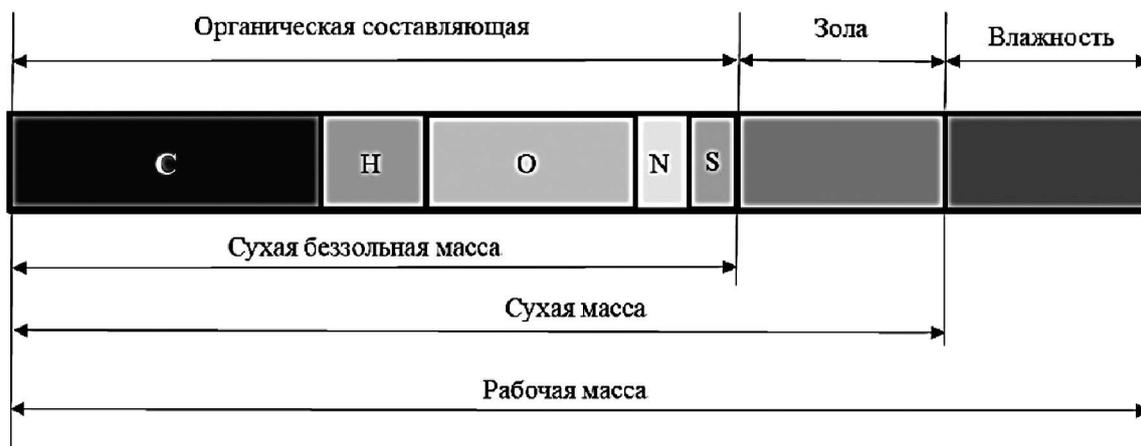


Рис. 1.2. Составляющие топлива
(C, H, O, N, S – содержание углерода, водорода, кислорода, азота и серы)

Теплота сгорания ТКО, помимо влажности и зольности (внешнего балласта топлива), определяется соотношением основных элементов (C, H, O, N, S) и зависит от содержания горючих элементов (углерода, водорода и серы). Основным горючим элементом ТКО является углерод, высокое содержание которого обуславливает выделение основного количества теплоты (удельная теплота сгорания углерода составляет 34,1 МДж/кг). Вторым по значимости элементом в составе ТКО является водород, который имеет более высокую удельную теплоту сгорания – 120,5 МДж/кг, однако его содержание в отходах сравнительно невелико,

поэтому доля водорода в суммарном выделении тепла при горении ТКО значительно меньше, чем углерода. Сера содержится в топливе в небольших количествах, имеет невысокую теплоту сгорания – 9,3 МДж/кг, а при горении образует токсичные оксиды серы и вызывает сернокислотную коррозию поверхностей нагрева котла. Поэтому сера не рассматривается как целевой элемент с точки зрения топлива. Кислород и азот, связанные в виде органических соединений с горючими элементами топлива, также снижают удельную теплоту его сгорания.

Теплотехнические характеристики ТКО следует определять по методике ВТИ, в соответствии с которой, отобранная средняя проба отходов предварительно путем просеивания через грохот (решетку) с размером ячеек 50×50 мм, разделяется на мелкую (подрешеточную) и крупную (надрешеточную) фракции.

Далее надрешеточная фракция сортируется по компонентам или, более правильно сказать, по компонентным группам (в табл. 1.4 показано, что в состав компонентной группы может входить до 11 различных типов отходов). Определяется массовая доля каждой из компонентных групп, включая долю мелкой фракции, – K_n^r . Затем в лабораторных условиях измеряется влажность в рабочем состоянии (W_{in}^r) и зольность в сухом состоянии (A_n^d) компонентных групп, а затем рассчитываются интегральные значения теплоты сгорания (Q_i^r), влажности (W_i^r) и зольности (A^r) в целом для ТКО по формулам:

$$Q_i^r = \sum \left[K_n^r (1 - W_{in}^r / 100) (1 - A_n^d / 100) \cdot Q_{in}^{daf} \right] - 0,02442 \cdot \sum (K_n^r \cdot W_{in}^r); \quad (1.1)$$

$$W_i^r = \sum (K_n^r \cdot W_{in}^r); \quad (1.2)$$

$$A^r = \frac{\sum \left[K_n^r A_n^d (100 - W_{in}^r) \right]}{\sum \left[K_n^r (100 - W_{in}^r) \right]} \cdot \left[1 - \frac{\sum (K_n^r W_{in}^r)}{100} \right], \quad (1.3)$$

где Q_{in}^{daf} – низшая удельная теплота сгорания в сухом беззольном состоянии отдельной компонентной группы.

Следует отметить, что большинство из выделенных компонентных групп ТКО в зависимости от времени года, источника (места) образования, состава и размера фракций имеют различную влажность и зольность. Так, например, мелкие обрывки бумаги намокают сильнее: влажность фракции >100 мм составляет 26,5%, средняя влажность фракции 50–100 мм – 49,2%, влажность фракции 15–50 мм – 58,9% (рис. 1.3).

Влажность компонентов полимеров также существенно меняется (рис. 1.4). Так, влажность для фракции размером > 100 мм составляет от 2,3% для ПЭ-бутылки до 41,3% для пленки полиэтиленовой, при сред-

ней влажности 23,5%. Влажность для полимеров фракции 50–100 мм колеблется от 4,6% для ПЭТ-бутылки до 59,8% для полиэтиленовой пленки при средней влажности 41%. Для полимеров размером 15–50 мм влажность составляет 7,5% для полимерной упаковки и 38,5% для полимерных пленок при средней влажности 24,2%.

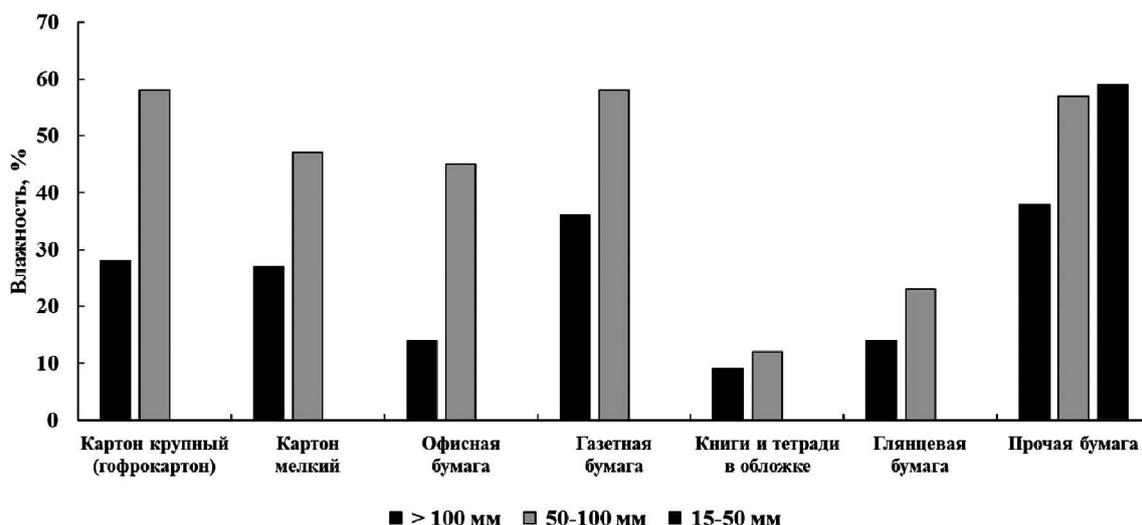
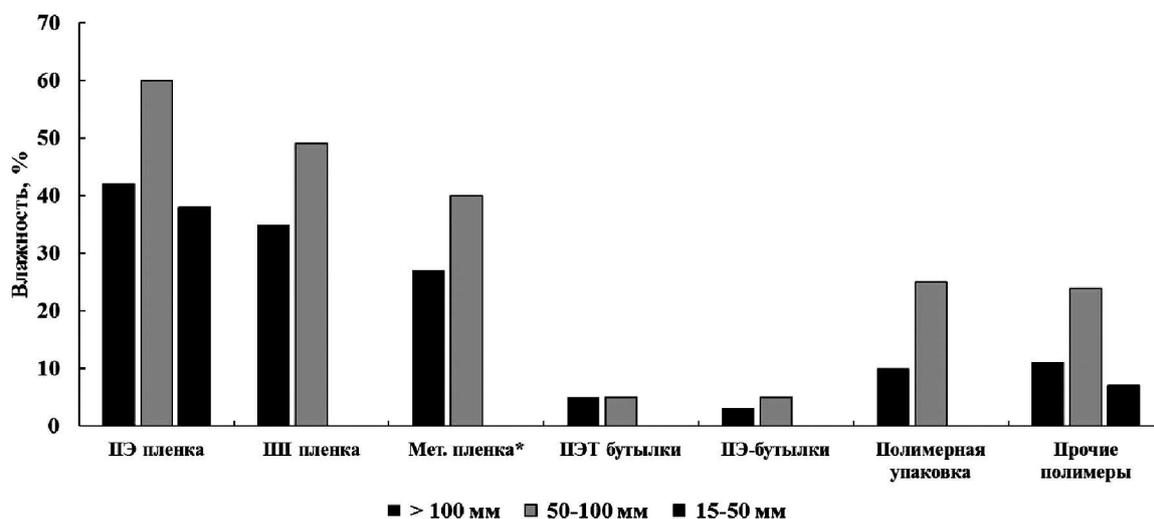


Рис. 1.3. Влажность отдельных видов бумаги по фракциям [4]



Примечание: * – Металлизированные и многослойные пленки

Рис. 1.4. Влажность отдельных видов полимеров по фракциям [4]

Интересно отметить, что некоторые полимерные отходы сами по себе не гигроскопичны, но к поверхности хорошо прилипают капельки влаги и кусочки пищевых остатков.

На основании выполненных лабораторных исследований можно сделать вывод, что значения влажности компонентной группы в целом существенно отличаются от значений содержания влаги в отдельных компонентах внутри этой группы, так как зависят от свойств и состава самих отдельных компонентов.

Зольность разных компонентов внутри одной компонентной группы также может существенно отличаться (рис. 1.5 и 1.6).

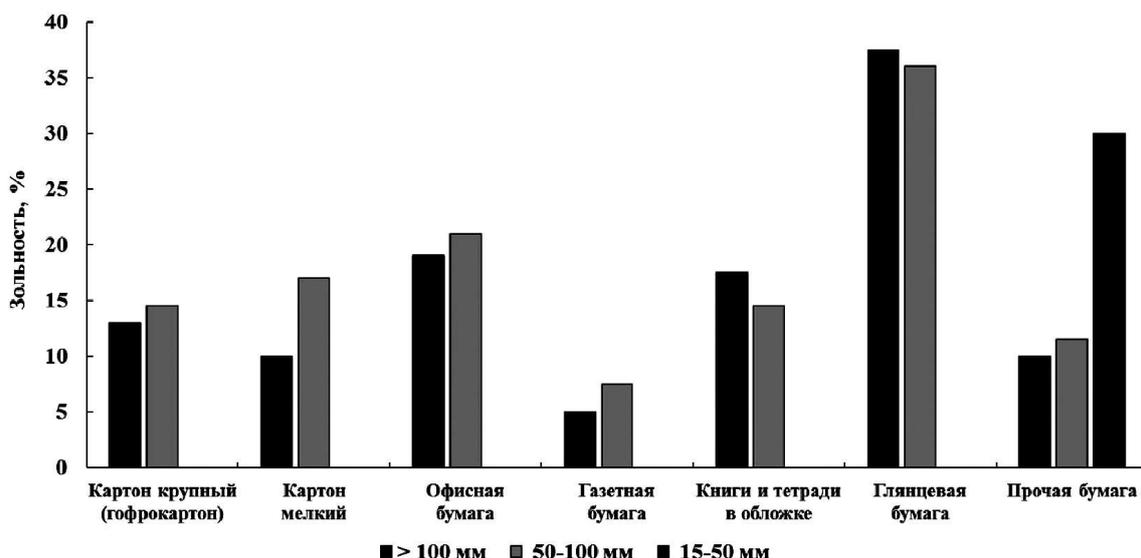
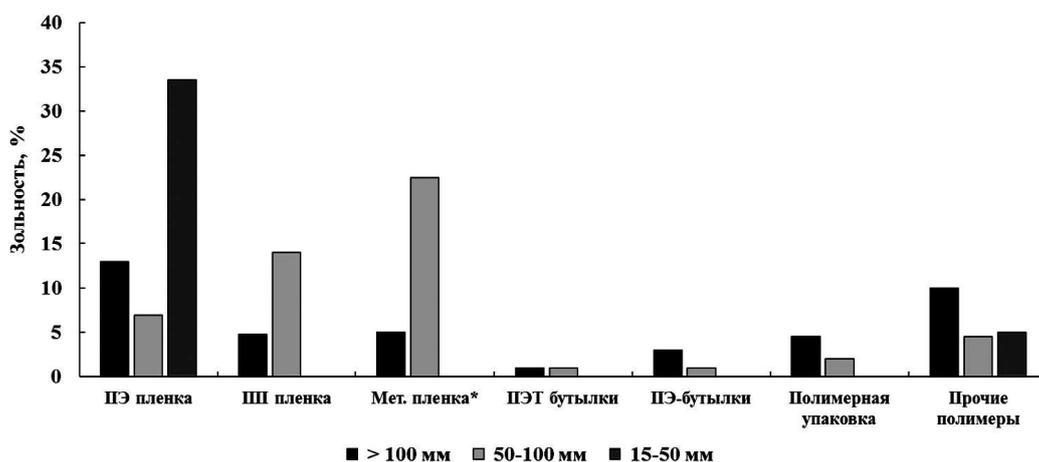


Рис. 1.5. Зольность (в сухом состоянии) отдельных видов бумаги по фракциям [4]



Примечание: * – Металлизированные и многослойные пленки

Рис. 1.6. Зольность (в сухом состоянии) отдельных видов полимеров по фракциям [4]

Зольность в сухом состоянии отдельных компонентов бумаги размером > 100 мм находится в диапазоне от 5,1 до 37,5% и бумаги размером 50–100 мм от 7,6 до 36,2% для газетной бумаги и глянцевой бумаги соответственно, что обусловлено особенностями состава отдельных компонентов. Например, глянцевая бумага содержит большое число неорганических добавок (из-за добавления мела ее еще называют «мелованной» бумагой), поэтому имеет высокую зольность. Зольность бумаги также зависит от размера фракции, как показано на рис. 1.5, зольность макулатуры размером > 100 мм имеет наименьшее значение – 12,8%, зольность макулатуры размером 50–100 мм составляет 14,8%, для прочей бумаги размером 15–50 мм – 30,2%.

Лабораторные исследования по определению зольности (в сухом состоянии) для разных компонентов варьирующихся размеров позволили установить, что зольность на сухую массу фракции 15–50 мм значительно выше по сравнению с фракцией 50–100 мм и более 100 мм, это объясняется тем, что мелкая фракция более загрязнена песком, который прилипает на поверхности компонентов.

Также надо иметь в виду, что зольность в сухом состоянии для разных компонентных групп ТКО меняется по сезонам года. Например, у макулатуры она изменяется для разных городов от 10–13% в осенний сезон до 15–18% в зимний период, у дерева колеблется по сезонам от 3,0 до 12% при средней 5,0%, у текстиля – 2,7–9,6% (при средней 5,3%). Четкой зависимости зольности для компонентов ТКО от сезона года не выявлено.

На основании изложенного можно заключить, что при определении теплотехнических характеристик ТКО на основании морфологического состава, влажность и зольность этих компонентных групп следует определять только в лаборатории.

Для примера в табл. 1.7 представлены усредненные значения по влажности и зольности некоторых компонентов ТКО г. Москвы, определенные в 2015 г.

Для оценочных расчетов допускается принимать значения влажности и зольности компонентных групп, указанные в табл. 1.8.

Зольность металлических отходов и неорганических материалов из-за прилипших горючих веществ несколько отличается от 100% и рекомендуется принимать для неорганических материалов (стекла, керамики) – 99,5%, металлических изделий – 98,9%. Зольность мелкой фракции (отсева) в любом случае должна быть определена только в лаборатории.

Таблица 1.7

**Усредненные значения по влажности и зольности
основных компонентных групп ТКО г. Москвы (2015 г.)**

Наименование компонента	Влажность				Зольность			
	Февраль	Июнь	Декабрь	$W_{n\text{ ср}}^r$, %	Февраль	Июнь	Декабрь	$A_{n\text{ ср}}^d$, %
Пищевые отходы	73,8	70,9	69,4	71,4	7,2	15,0	7,7	10,0
Бумага/картон	28,7	31,8	38,1	32,8	7,2	11,3	13,7	10,7
Металл, стекло, строительный мусор и т.д.	0,0	0,0	0,0	0,0	99,5	99,5	99,5	99,5
Текстиль	40,9	22,8	33,9	32,5	1,4	8,3	6,5	5,4
Кожа/резина	5,1	4,2	19,6	9,7	16,0	18,8	11,3	15,4
Пластмасса (в том числе пленка, бутылки, композиционные материалы)	20,4	16,4	23,2	20,0	3,6	5,6	6,9	5,3
Отсев (< 50 мм)	51,9	50,2	47,9	50,0	53,7	—	60,3	57,0

Таблица 1.8

**Рекомендуемые для оценочных расчетов значения зольности
и влажности компонентных групп ТКО**

Компоненты	A^d , %	W_t , %
Пищевые отходы	10–13	60–80*
Бумага/картон	10–17*	30–40*
Дерево	5	20
Металл	98,9	0,0
Текстиль	5,3	30–40*
Стекло	99,5	0,0
Кожа/резина	15	9–10
Пластмасса	5–15*	20–35*
Мелкие отходы (отсев < 50 мм)	52–80*	40–60*

* эти показатели должны определяться в лаборатории.

Для расчета теплоты сгорания ТКО в целом следует использовать следующие значения теплоты сгорания компонентных групп (в сухом беззольном состоянии), МДж/кг:

пищевые отходы.....	18,2
бумага.....	16,9
дерево.....	20,3
текстиль.....	22,6
пластмасса.....	27,4
пакеты для жидких продуктов питания.....	26,4
мелкие отходы (отсев менее 50 мм).....	20,1

Для металла и неорганических материалов теплота сгорания принимается равной нулю.

Расчет теплотехнических характеристик ТКО следует проводить в табличной форме. В таблице 1.9 представлен пример расчета этих характеристик для ТКО г. Москвы.

Основные теплотехнические характеристики ТКО крупных городов России в рабочем состоянии варьируется в зависимости от времени года в диапазоне $A^r - 27-35 \%$; $W^r - 30-45 \%$; $Q_i^r = 5,45-8,38$ МДж/кг.

Таблица 1.9

Расчет теплотехнических характеристик ТКО среднего состава г. Москвы

Наименование компонента	$K_n, \%$	W_{in}	$K_n \times W_{in}$	$K_n(100-W_{in})/100$	$K_n^d, \%$	A^d	$K_n^d \times A^d$	$K_n^d(100-A_n^d)/100$	$K^{daf}, \%$	$Q_{in}^{daf}, \text{ МДж/кг}$	$K_n^{daf} \times Q_{in}^{daf}$
Пищевые отходы	10	71,4	7,14	2,86	4,39	10	0,44	3,95	7,05	18,2	1,28
Бумага/картон	18	32,8	5,90	12,10	18,55	10,7	1,99	16,57	29,57	16,9	5,00
Древесина	0,7	20	0,14	0,56	0,86	5	0,04	0,82	1,46	20,3	0,30
Текстиль	4	32,5	1,30	2,70	4,14	5,4	0,22	3,92	6,99	22,6	1,58
Кожа /резина	0,7	9,7	0,07	0,63	0,97	15,4	0,15	0,82	1,46	31,1	0,46
Пластмасса	16	20	3,20	12,80	19,63	5,3	1,04	18,59	33,18	27,4	9,09
Отсев	34,1	50	17,05	17,05	26,15	57	14,91	11,24	20,07	20,1	4,03
Металл, стекло, строительный мусор и т.д.	16,5	0	0,00	16,50	25,31	99,5	25,18	0,13	0,23	0	0,00
Итого	100	$W_t^r = 34,8$			100	$A^d = 43,97$					
						$A^r = 28,67$				$Q_i^r = 7,93$	

1.6. Элементный состав

Элементный состав ТКО в сухом беззольном состоянии определяется по морфологическому составу с использованием справочных данных по содержанию в основных компонентных группах ТКО углерода C_n^{daf} , водорода H_n^{daf} и азота N_n^{daf} (табл. 1.10).

Таблица 1.10

**Элементный состав отдельных компонентных групп ТКО
в сухом беззольном состоянии, %**

Компонентные группы	C_n^{daf}	H_n^{daf}	N_n^{daf}
Пищевые отходы	53,6	7,7	4
Бумага/картон	46,2	6,2	0,27
Древесина	51,0	6,1	0,67
Текстиль, кожа/резина	56,1	6,8	4,8
Пластмасса	67,7	9,3	1,1
Отсев (< 50 мм)	52,4	6,7	1,4
Стекло, металл	58,5	6,6	0,1

Далее, по доле горючей части каждой компонентной группы и суммарного содержания горючей части ТКО определяется доля горючей части каждой компонентной группы в общей горючей части ТКО – K_n^{daf} .

Например, содержание углерода в горючей части ТКО рассчитывается как:

$$C^{daf} = \sum (K_n^{daf} \cdot C_n^{daf}). \quad (1.4)$$

Аналогично определяются H^{daf} и N^{daf} .

Результаты расчетов углерода, водорода и азота в сухом беззольном состоянии для ТКО г. Москвы приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

**Оценка содержания углерода, водорода и азота в ТКО
г. Москвы в сухом беззольном состоянии**

Компонентные группы	$K_n^{daf}, \%$	C_n^{daf}	$K_n^{daf} C_n^{daf}$	H_n^{daf}	$K_n^{daf} H_n^{daf}$	N_n^{daf}	$K_n^{daf} N_n^{daf}$
Пищевые отходы	7,05	53,60	3,78	7,70	0,54	4,00	0,28
Бумага/картон	29,57	46,20	13,66	6,20	1,83	0,27	0,08
Древесина	1,46	51,00	0,74	6,10	0,09	0,67	0,01
Текстиль	6,99	56,10	3,92	6,80	0,48	4,80	0,34
Кожа/резина	1,46	56,10	0,82	6,80	0,10	4,80	0,07
Пластмасса	33,18	67,70	22,46	9,30	3,09	1,10	0,36
Отсев	20,07	52,40	10,52	6,70	1,34	1,40	0,28
Металл, стекло, строительный мусор и т.д.	0,23	58,50	0,13	6,60	0,015	0,10	0,0002
Средневзвешенное значение ТКО	—	—	56,04	—	7,48	—	1,42

Для ТКО элементный состав серы и хлора в сухом беззольном состоянии может меняться в диапазоне $S^{daf} - 0,7-1,25\%$, $Cl^{daf} - 0,77-1,0\%$. В расчетах при определении элементного состава ТКО крупных городов содержание серы и хлора в сухом беззольном состоянии следует принимать 0,93% и 0,87% соответственно.

В соответствии с ГОСТ 2408.3-90 [6] содержание кислорода можно рассчитать по разности между 100% и суммой ($C^{daf} + H^{daf} + N^{daf} + S^{daf} + Cl^{daf}$). Имея полный элементный состав ТКО в сухом беззольном состоянии, можно определить их состав в рабочем состоянии.

Например, для углерода:

$$C^r = C^{daf} \times \frac{100 - W_{cp}^r - A_{cp}^r}{100}. \quad (1.5)$$

Аналогично определяют значения H^r , N^r , O^r , S^r и Cl^r .

В таблице 1.12 показаны элементные составы ТКО г. Москвы в расчете на сухое беззольное, сухое и рабочее состояние.

Таблица 1.12

Элементный состав ТКО г. Москвы

Состояние ТКО	Элементный состав							
	С	Н	О	Н	S	Cl	A	W
Сухое беззольное	56,04	7,48	33,26	1,42	0,93	0,87	—	—
Сухое	31,40	4,19	18,64	0,80	0,52	0,49	43,97	—
Рабочее	20,47	2,73	12,15	0,52	0,34	0,32	28,67	34,8

Элементный состав ТКО в сухом беззольном состоянии может меняться в диапазоне: $C^{daf} - 55-57,5\%$; $H^{daf} - 7,2-7,6\%$; $O^{daf} - 32,4-35,3\%$; $N^{daf} - 1,0-1,5\%$; $S^{daf} - 0,7-1,25\%$, $Cl^{daf} - 0,77-1,0\%$. В рабочем состоянии для крупных городов России он варьируется в зависимости от времени года в диапазоне $C^r - 17-21\%$; $H^r - 2,3-2,8\%$; $O^r - 10-13\%$; $N^r - 0,3-0,6\%$; $S^r - 0,25-0,4\%$, $Cl^r - 0,27-0,4\%$.

1.7. Химический состав минеральной части

Наиболее надежным методом определения химического состава минеральной части ТКО можно считать испытания, во время которых отбираются пробы твердых продуктов сгорания. При этом измеряется их количество и определяется их химический состав. Необходимо знать также выход вредных газообразных веществ. По обратному балансу можно вычислить состав минеральной части сжигаемых ТКО.

На основании выполненных в [1] исследований получены данные химического состава минеральной части московских ТКО, %:

SiO ₂	57,9–76,4
TiO ₂	0,4–0,6
Al ₂ O ₃	3,7–5,0
Fe ₂ O ₃	1,3–2,2
CaO	8,1–14,0
MgO	0,8–1,1
K ₂ O	1,1–1,5
Na ₂ O	2,0–4,9
SO ₃	2,7–6,2
P ₂ O ₅	0,9–4,4
Cl	1,3–1,6
микроэлементы	0,5–0,6

Эти данные могут быть использованы в расчетах свойств ТКО и для других крупных городов России.

1.8. Оценка энергетического потенциала ТКО в России

В РФ продолжается рост объемов образования ТКО, и практически все они направляются на объекты захоронения (рис. 1.7).

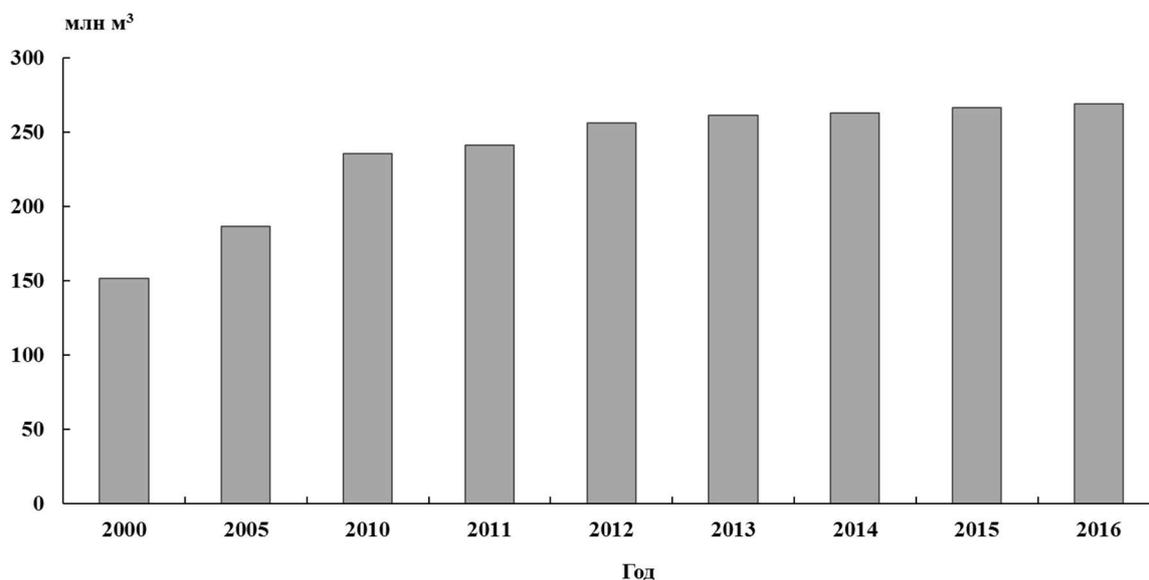


Рис. 1.7. Динамика вывоза ТКО на объекты захоронения в России

Если принять среднюю плотность отходов на уровне 0,2 т/м³, то можно считать, что ежегодно в России образуется около 55 млн тонн.

Средняя теплота сгорания российских ТКО в рабочем состоянии составляет примерно 8 000 МДж/т. Эффективность преобразования энергopotенциала ТКО в электрическую энергию на современных предприятиях находится на уровне 20%. Обычно количество часов работы такого предприятия составляет примерно 8 100 ч/год.

Тогда суммарная расчетная электрическая мощность при условии сжигания всех образующихся в России ТКО: $N_{эл} = (55 \cdot 10^6 \cdot 8000 \cdot 0,2) / (8100 \cdot 3600) = 3018$ МВт (примерно 3 ГВт).

Понятно, что сооружение предприятий для энергетической утилизации ТКО целесообразно только в крупных городах. Кроме того, повсеместно внедряется отдельный сбор отходов и растет количество предприятий по их сортировке. С учетом этого, на энергетическую утилизацию в перспективе можно будет направлять лишь половину всех образующихся ТКО. Тем не менее, и в этом случае энергетический потенциал ТКО России будет достаточно весомым и при существующем объеме образования ТКО (примерно 270 млн м³ отходов в год) составлять примерно 1,5 ГВт.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое нормы накопления, и какие факторы влияют на образование ТКО?
2. Какие основные компоненты характеризуют морфологический состав ТКО? Как определяют морфологический состав? В чем отличие морфологического состава ТКО, образующихся в жилом фонде, от отходов общественных и торговых предприятий?
3. Назовите размеры ячеек сит, которые используют для определения фракционного состава ТКО.
4. Что понимают под особыми свойствами ТКО?
5. В чем специфика определения теплотехнических свойств ТКО (влажности, зольности, теплоты сгорания) по сравнению с традиционным твердым топливом (углем, торфом, горючим сланцем)?
5. Как определяют элементный состав ТКО?
6. Оценить энергетический потенциал ТКО России в случае увеличения теплоты сгорания ТКО на 20% и повышения электрического КПД предприятий для энергетической утилизации отходов до 22%.

2. ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТКО В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Вывоз ТКО на свалки (полигонное захоронение) по-прежнему остается во многих странах мира основным способом решения проблемы с отходами. Например, в России более 96% всех ТКО поступает непосредственно на полигоны. Кроме общеизвестных на протяжении многих лет негативных последствий полигонного захоронения для окружающей среды (отчуждение земель, загрязнение подземных вод, пожары с залповым выбросом таких канцерогенных веществ как диоксины и бензопирены), сейчас на первый план выходит выделение свалочного газа – биогаза захоронений, который образуется в теле полигона в результате анаэробного сбраживания органической части ТКО. В состав свалочного газа входит метан, который в 22 раз опаснее CO_2 с точки зрения парникового эффекта, вызывающего глобальное потепление. В тоже время сжигание свалочного газа, извлекаемого из тела полигона захоронения ТКО, в газопоршневых установках или в специальных газогорелочных устройствах для получения тепловой или электроэнергии может быть одним из вариантов использования ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов.

Сейчас много говорится о необходимости отдельного сбора и сортировки ТКО, в результате которой часть отходов возвращается для повторного применения (рециклинг) или в качестве сырья направляется на дальнейшую обработку с целью получения товарного продукта. Оставшаяся (большая) часть ТКО может использоваться для изготовления, так называемого топлива из отходов (Refuse Derived Fuel – RDF) путем дальнейшей сортировки ТКО, удаления нежелательных компонентов, в ряде случаев дробления и грануляции. RDF может применяться в качестве дополнительного топлива, например, в цементных печах. И это еще один способ использования ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов.

Но, безусловно, наиболее распространенным способом энергетической утилизации ТКО является их использование как топлива на предприятиях для термической переработки (огневого обезвреживания), где путем сжигания, газификации и/или пиролиза энергетический потенциал отходов преобразуется в тепловую и электрическую энергию.

Рассмотрим более подробно эти три возможных способа энергетического использования ТКО.

2.1. Энергетическое использование свалочного газа (биогаза захоронений ТКО)

2.1.1. Состав и свойства биогаза захоронений

В настоящее время захоронение ТКО на полигонах – все еще преобладающий способ решения проблемы с ТКО для большинства тех стран, в которых национальная экономика недостаточно развита для больших вложений в сложные технологии переработки отходов.

Полигон – это естественный или искусственный земляной карьер, достигающий площади в несколько гектар, с глубиной 10–20 м и более, находящийся над плотными водонепроницаемыми слоями земли и имеющий многослойный защитный экран из искусственных и естественных материалов. Все полигоны по мере их заполнения подвергаются уплотнению тяжелой механической техникой с одновременной засыпкой слоями грунта. Это делается с целью перевода всех реакций в массе полигонного мусора в анаэробное состояние. В результате процессов анаэробного разложения органической фракции отходов, т.е. разложения, которое происходит в отсутствие кислорода, образуется газ захоронений – свалочный газ (биогаз).

Образование биогаза можно разделить на четыре фазы.

1. *Гидролизная фаза.* Во время протекания этой фазы, в результате жизнедеятельности бактерий, устойчивые субстанции (протеины, жиры и углеводы) разлагаются на простые составляющие (аминокислоты, глюкоза, жирные кислоты).

2. *Кислотообразующая фаза.* Получившиеся составляющие на первой фазе разлагаются кислотообразующими бактериями на другие органические вещества (уксусную, пропионовую кислоты, спирты и альдегиды) и неорганические вещества H_2 , CO_2 , N_2 , H_2S . Этот процесс протекает до тех пор, пока развитие бактерий не замедлится под действием образованных кислот.

3. *Ацетогенная фаза.* Под воздействием ацетогенных бактерий из образованных кислот вырабатывается уксусная кислота.

4. *Метаногенез.* Уксусная кислота разлагается на метан, углекислый газ и воду. Частично водород и углекислый газ преобразуются в метан и воду.

Обычный состав биогаза (по основным компонентам) включает в себя: метан – от 40 до 75%, диоксид углерода (углекислый газ) – от 30 до 45%, азот – от 5 до 15%, кислород – от 0 до 2%, сероводород и другие соединения – от 4 до 6%.

Выделение и свободное распространение биогаза такого состава оказывает негативное влияние на окружающую среду, как в локальном, так и в глобальном масштабах. Биогаз оказывает негативное воздействие на растительный покров. Его токсичное действие обусловлено главным образом присутствием в нем сероводорода и углекислого газа. Причиной угнетения растительности на примыкающих к полигонам ТКО площадях является насыщение этими газами порового пространства почвы и вытеснение из нее кислорода.

Кроме этого, следует учитывать, что биогаз относится к числу газов, создающих «парниковый эффект», влияющий на изменение климата земли в целом. Основным среди газов, приводящих к возникновению парникового эффекта, является углекислый газ. Его рассматривают в качестве базы для сравнения. Возникновению парникового эффекта способствуют и другие газы. Для таких газов рассчитывается коэффициент, при этом основанием для расчета служит углекислый газ. Для метана (по различным литературным источникам) этот коэффициент колеблется в пределах от 14 до 50. Международное сообщество установило свой коэффициент для метана как газа, приводящего к парниковому эффекту, – 22.

Биогаз является также причиной появления неприятных запахов, очень горюч и взрывоопасен. Биогаз является одной из причин возгорания ТКО на полигонах и свалках: при содержании в воздухе от 5 до 15% метана и 12% кислорода образуется взрыво-пожароопасная смесь.

В тоже время по теплоте сгорания 1 м³ биогаза эквивалентен 0,3–0,4 кг мазута, 1,5 кг дров или 0,5–0,6 м³ природного газа (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Сравнение состава и теплоты сгорания природного газа и биогаза

Составляющая	Ед. измерения	Природный газ	Биогаз
Метан	% об.	80–97	40–75
Углекислый газ	% об.	0,1–0,8	30–45
Азот	% об.	1–13	5–15
Кислород	% об.	—	0–2
Водород	% об.	—	< 1,0
Сероводород	% об.	—	4–6
Теплота сгорания	МДж/м ³	35–37	15–27

В зависимости от содержания метана теплота сгорания биогаза может достигать 27 МДж/м³. При содержании в биогазе свыше 60% метана биогаз считается ценным топливом.

Из одной тонны ТКО может образовываться около 130 м³ биогаза, содержащего около 50% метана. Принято считать, что собирать биогаз можно в течение 25 лет. На рисунке 2.1 изображен процесс образования биогаза, из которого видно, что максимальные объемы достигаются по прошествии 5–6 лет, после чего кривая его образование идет на убыль.

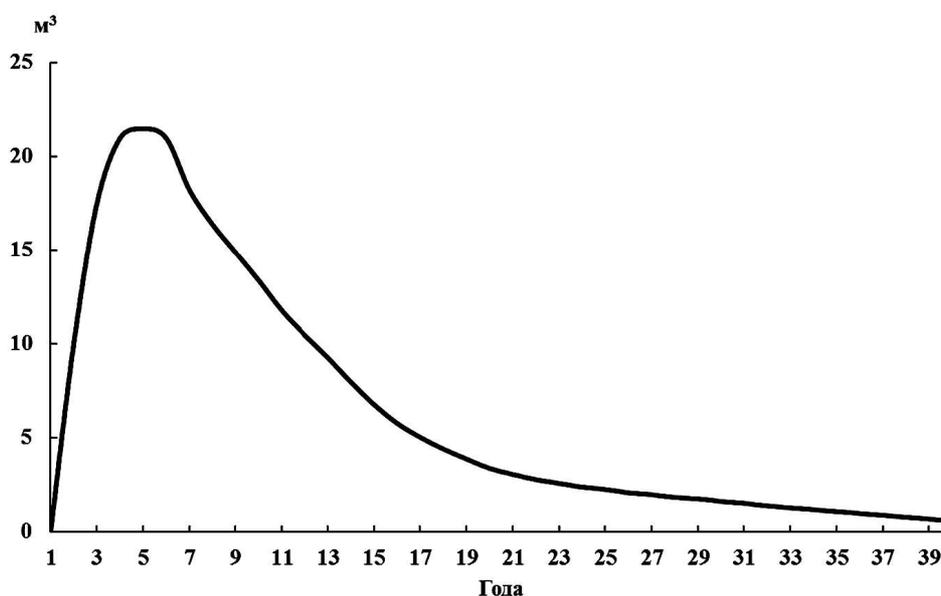


Рис. 2.1. Изменение объема биогаза, образующегося из 1 тонны ТКО [7]

Приведенные выше факты являются серьезным аргументом в пользу обязательного сбора и использования газа захоронений.

Практически можно утилизировать до 50–80% образующегося на полигоне биогаза при условии, что функционирует надежная система добычи, и что биогаз утилизируется на протяжении бóльшей части времени разложения отходов.

2.1.2. Добыча биогаза на полигонах

Для того чтобы осуществлять эффективное производство свалочного газа, необходим полигон специальной конструкции, который бы отвечал всем современным экологическим нормам и не загрязнял почву и грунтовые воды.

Дно вырытого котлована застилается специальной геомембраной, а затем накрывается слоем глины, толщиной приблизительно в метр. Геомембрана представляет собой гидроизоляционный материал, который также способен выполнять и дренирующие функции. Подобная надежная защита необходима для предотвращения проникновения продуктов гниения мусора в почву и в грунтовые воды.

ТКО загружают в котлован слоями, затем, в конце каждого рабочего дня отходы утрамбовываются машинами-катками и засыпают слоем глины толщиной до 30 см. После заполнения котлована отходами, он накрывается кровлей и защитным покрытием. Кровлей является толстый слой глины, уложенной поверх ТКО и утрамбованной специальными катками, и геомембрана. Защитное же покрытие представляет собой тонкий слой почвы с растительным покровом.

Принципиальная схема сбора и утилизации биогаза приведена на рис. 2.2.

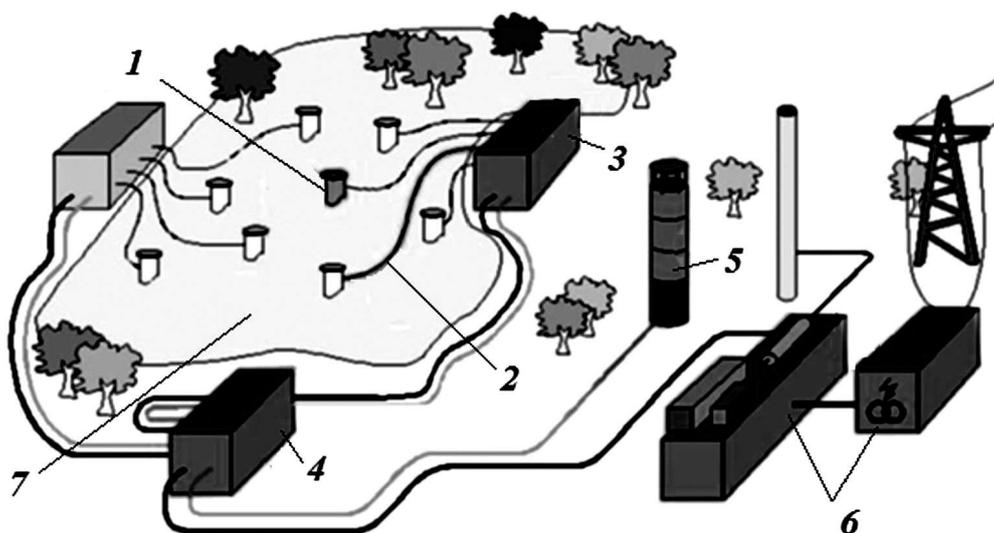


Рис. 2.2. Схема добычи и утилизации биогаза захоронений²:

- 1 – газовые скважины; 2 – соединительные газопроводы; 3 – пункты сбора газа;
 4 – газокompрессорная станция; 5 – факельная установка;
 6 – блочно-модульная теплоэлектростанция и трансформаторная станция;
 7 – система сбора конденсата (располагается в нижней точке полигона)

Для добычи биогаза с полигона наиболее часто используют вертикальные скважины, которые сооружают по всей площади полигона либо вдавливанием в тело полигона стальных перфорированных труб, либо бурением в теле полигона на 3/4 его глубины.

В российских условиях наиболее целесообразно шнековое бурение. Оно сравнительно недорого и легкодоступно, так как широко используется в инженерно-геологических изысканиях. При использовании этого вида бурения максимально возможный диаметр скважин составляет 0,5 м. Однако строительство скважин такого диаметра в российских

² – Энергетический потенциал свалочного газа на полигонах ТБО 2013 (аналитическая записка). [Элек. ресурс] — Режим доступа: <http://www.belfes.ru/Biblioi/TKO/Vladivostok.pdf>

условиях встречает ряд трудностей, связанных с присутствием большого количества инородных включений (металлических и бетонных конструкций, остатков техники, механизмов и пр.) в свалочной толще, затрудняющих бурение и приводящих к частой поломке бурового инструмента. Как показывает опыт, относительно легко могут быть пробурены скважины диаметром 250–300 мм, которые вполне пригодны для добычи биогаза.

Инженерное обустройство скважины включает несколько этапов (рис. 2.3).

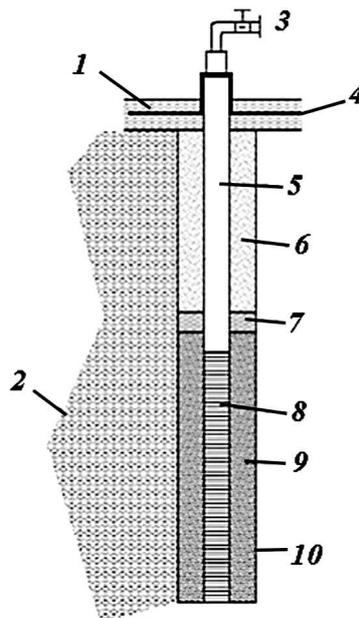


Рис. 2.3. Принципиальная схема скважины для добычи биогаза захоронений:

1 – защитное покрытие полигона; 2 – отходы; 3 – оголовок скважины; 4 – геомембрана; 5 – труба цельная; 6 – глиняный замок; 7 – бетонитовое уплотнение; 8 – труба перфорированная; 9 – пористый материал (гравий); 10 – ствол скважины

На первом – в скважину опускается перфорированная стальная или пластиковая труба, заглушенная снизу и снабженная фланцевым соединением в приустьевой части. Затем в межтрубное пространство засыпается пористый материал (например, гравий) с послойным уплотнением до глубины 3–4 м от устья скважины. На последнем этапе сооружается глиняный замок мощностью 3–4 м для предотвращения попадания в скважину атмосферного воздуха. После завершения строительства приступают к установке оголовка скважины, представляющего собой металлический цилиндр, снабженный арматурой для осуществления контроля состава биогаза и регулирования его расхода (дебита скважины), а также патрубком для присоединения скважины к транспортному газопроводу.

Каждая скважина осуществляет сбор биогаза из пространства тела полигона, условно имеющего форму цилиндра радиусом 30–50 м. Устойчивость работы скважины может быть обеспечена, если ее дебит не превышает объема вновь образующегося свалочного газа. Оценка газопродуктивности существующей толщи ТКО проводится в ходе предварительных полевых газо-геохимических исследований. При этом надо учитывать, что для добычи свалочного газа пригодны свалочные тела глубиной не менее 10 м, и экономически целесообразно использовать биогаз через 3–4 года после открытия полигона (см. рис. 2.1).

Выход биогаза из пробуренной скважины глубиной 10 м обычно составляет 10–20 м³/ч. Если глубина участка полигона возрастает, то возрастают и возможности увеличения сбора биогаза (при глубине 25–30 м до 40–50 м³/ч).

Считается, что при размещении газовых скважин по центру участка полигона объем выхода биогаза будет удвоенным, по сравнению с объемом биогаза из скважин, расположенными по периферии участка или вблизи откосов полигона.

Расстояние между газовыми скважинами на участке утилизации биогаза должно составлять от 30 до 100 м, в зависимости от упомянутых выше факторов.

В том случае, если число газовых скважин на полигоне оптимально, а его откосы уплотнены, возможно утилизировать до 80% образующегося на полигоне биогаза. При неуплотненных откосах полигона утилизация биогаза снижается до 70%.

Эффективность и срок службы газовых скважин зависит от следующих факторов:

- тенденции отходов оседать;
- уровня грунтовых вод;
- закупоривания фильтра;
- водозатворов в выходных трубах.

Предусмотреть все возникающие на полигонах явления, которые смогут оказать негативное влияние на системы сбора биогаза, невозможно. Это особенно относится к системам, работающим на действующих полигонах. Практика показывает, что в течение 10 лет эксплуатации приходится обновлять большую часть газовых скважин и фильтров.

После извлечения биогаза из тела полигона и его поступления в транспортные газопроводы, происходит резкое снижение температуры, что приводит к образованию конденсата. Дело в том, что при анаэробном разложении органической фракции ТКО температура тела полигона, в

случае качественного изолирующего покрытия, повышается до 25–35°C. Следовательно, и температура образующегося биогаза также будет достигать 25–35°C.

Поскольку отходы имеют высокую влажность, высоким будет и влагосодержание биогаза. Часто он находится в состоянии насыщения при обычной температуре. Ниже показано примерное влагосодержание биогаза (условия насыщения), в г/м³, при различных температурах, °С.

Температура	Влагосодержание
+30	30
+30	17
+30	9
+5	7
0	5
-5	3

При снижении температуры насыщенного биогаза с 30°C до температуры окружающей среды, например, до 10°C в системе газопровода может образовываться до 20 г/м³ конденсата. Таким образом, на установке, в состав которой входит 20 скважин, в сутки образуется до 200 л конденсата. В связи с этим первостепенной задачей является отвод конденсата, так как его наличие в газопроводе может затруднить или даже сделать невозможной добычу биогаза.

Для решения этой задачи газопроводные трубы в пределах полигона укладывают с уклоном в сторону сбора конденсата, который должен быть, по крайней мере, 20%. При прокладке линий газопровода с целью исключения скопления конденсата также устанавливают конденсатоотводчики, обеспечивающие удаление влаги из системы. Конденсатоотводчик представляет собой стальной сварной резервуар для стока конденсата с системой гидрозатвора.

Образующийся в трубопроводах конденсат имеет состав, схожий с составом фильтрата, который образуется на полигонах, поэтому конденсат направляют непосредственно в систему сбора фильтрата для последующей очистки.

Сбор биогаза, образующегося на участке полигона, осуществляется с помощью создания разрежения в системе его утилизации. Это разрежение создается на газокompрессорной станции. Требуемое давление для транспортировки биогаза по газопроводу к потребителю или к горелкам факельной установки также создается на этой станции. Перед подачей на компрессор собранный биогаз направляется в скруббер – специальный

газоочистительный аппарат, который используется в различных химико-технологических процессах для очистки газов от примесей. Здесь газ очищается от частиц пыли и ненужных примесей (например, серы) и становится готовым к дальнейшему использованию.

Для улучшения рабочих условий и облегчения обслуживания, а также для того, чтобы избежать проблем, возникающих при уплотнении и проседании отходов в теле полигона, газокompрессорные станции обычно размещают в зданиях вне участка полигона.

Регулирование выхода биогаза с полигона осуществляется путем регулирования числа оборотов вентилятора или компрессора, для чего часто используют преобразователь частоты.

На компрессорной станции непрерывно измеряются следующие параметры биогаза:

- содержание кислорода;
- содержание метана;
- давление;
- температура;
- содержание метана в окружающей среде.

С помощью непрерывного измерения содержания кислорода в биогазе возможно предотвратить образование взрывоопасной смеси метана и воздуха в системе. Устанавливается кислородомер с двумя сигнальными устройствами, из которых нижнее, служит для подачи аварийного сигнала, а верхнее – для отключения установки.

Содержание метана в биогазе также измеряется непрерывно, что в некоторых случаях упрощает эксплуатацию установки. С помощью этого измерения можно регистрировать показатель качества биогаза и предпринимать корректирующие действия, в случае выхода биогаза низкого качества.

Давление биогаза до (разрежение) и после (повышенное давление) вентилятора или компрессора непрерывно контролируется с помощью преобразователей давления. То же самое относится к температуре биогаза после вентилятора или компрессора. Наличие этих измерений необходимо для отключения установки в случае, если будут превышены их предельные значения.

На станции устанавливают устройство аварийной сигнализации о превышении содержания метана в окружающем воздухе, например, в случае утечек биогаза в здании. Так же, как и в случае кислородомера, это устройство имеет два аварийных сигнала.

Эксплуатационная надежность установок по утилизации биогаза должна быть высокой, в связи с чем, в наличии должна находиться резервная линия с вентилятором (компрессором).

2.1.3. Утилизация биогаза

Основные способы утилизации биогаза представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Способы утилизации биогаза захоронений

Метод утилизации	Устройство	Утилизация энергии
Факельное сжигание на полигонах	Газовые горелки	Отсутствует
Прямое сжигание с выработкой энергии	Водогрейные котлы	Отопление водяное
	Воздухоподогреватели	Сушилки
	Парогенераторы	Производство пара, электричества
	Газовые турбины	Электричество, турбопривод
Использование в газовых сетях общего назначения после очистки и обогащения	Трубопровод	Газоснабжение бытовых помещений

Факельное сжигание биогаза обеспечивает устранение неприятных запахов, снижает пожароопасность на территориях полигонов ТКО и свалок, уменьшает влияние на парниковый эффект.

Сжигание биогаза в количестве 1 млн м³ в год дает снижение выбросов парниковых газов на 5,5–10 тыс. т в СО₂-эквиваленте в зависимости от содержания метана в биогазе. Однако в этом случае энергетический потенциал биогаза в хозяйственных целях не используется.

Прямое сжигание биогаза с выработкой тепловой и электрической энергии получило наибольшее распространение в мире. Обычно для этого используют блочно-модульные теплоэлектростанции с выработкой электрической и тепловой энергий (рис. 2.2). Электроэнергия и тепло могут подаваться в сеть, а могут использоваться для собственных нужд полигона. Такая электростанция представляет собой газопоршневой двигатель мощностью 500–1350 кВт и генератор, выполненные в контейнерном исполнении. Электрический КПД – до 41%; тепловой КПД – примерно 39%.

Одна из проблем энергетического использования биогаза захоронений заключается в достаточно сложной очистке биогаза от вредных примесей, в том числе и от дурнопахнущих веществ, а также в его обогащении и повышении концентрации содержащегося в нем метана. Следует также отметить, что при прямом сжигании биогаза в энергоустановках и

двигателях внутреннего сгорания происходит постепенная коррозия оборудования: приблизительно через 5 лет работы на биогазе двигатель требует замены. Причиной коррозии является присутствие в биогазе хлор- и хлорфтороуглеводородов (трихлорфторметана, дихлордифторметана, винилхлорида, трихлорэтилена, тетрахлорэтилена и др.), при сгорании которых образуется хлористый водород. Проблема предотвращения коррозии может решаться сорбционной очисткой газа от галоидных углеводородов, нейтрализацией действия хлористого водорода, введением в масло двигателей соответствующих добавок, а также изготовлением ответственных деталей двигателей из коррозионностойких материалов. Однако все это – дорогостоящие мероприятия.

Энергетическое использование биогаза с выработкой тепла и энергии целесообразно, если его расход составляет более 50 м³/ч при содержании в нем метана не менее 40%. Если эти значения не достигаются, то более рациональны технологии сжигания биогаза без использования выделяемой энергии (факельное сжигание).

При использовании биогаза в газовых сетях общего назначения, требуется его тщательная очистка от различных примесей и запаха, а также доведение содержания в нем метана до 94–95%.

Целесообразность применения того или иного способа утилизации биогаза зависит от конкретных условий хозяйственной деятельности на полигоне ТКО, государственной политики и во многом определяется наличием платежеспособного потребителя биогаза или энергии, полученной за счет его сжигания. Следует отметить, что в развитых странах утилизация биогаза стимулируется государством: установлено льготное налогообложение для предприятий, использующих биогаз свалок в энергетических целях; продажа биогаза или отпускаемой энергии осуществляется по «зеленым» тарифам, которые в 2–2,5 раза выше цены энергоносителей, произведенных на основе традиционных топлив (природного газа, угля).

2.1.4. Существующее положение и перспективы энергетического использования биогаза захоронений

В 1990 г. в мире действовала 481 установка по эксплуатации газа захоронений, на которых сжигали чуть более 0,5 млрд м³ газа.

Сейчас объем утилизация биогаза увеличился в 2,4 раза и составляет около 1,2 млрд м³/год. Однако и это количество мало, по сравнению с объемом его образования: всего 1% глобальной эмиссии свалочного газа [8].

Более 80% полигонов ТКО, на которых добывается и используется свалочный газ, находится в США, Германии, Великобритании и Нидерландах. Только в США существует примерно тысяча полигонов, где биогаз собирается и сжигается. Примерно третья часть этих полигонов использует биогаз для получения тепловой или электрической энергии. В заметных объемах биогаз добывается и утилизируется в других развитых странах: Швеции, Франция, Италия, Канаде (рис. 2.4).

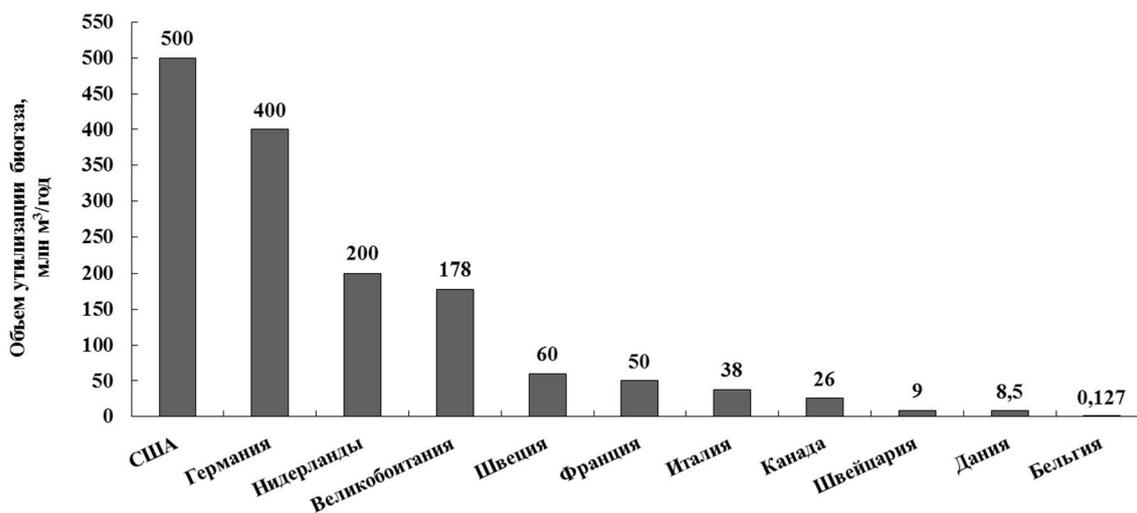


Рис. 2.4. Объем ежегодной утилизации биогаза в странах мира [8]

Большое количество биогазовых установок действуют в Китае и Индии. Есть установки в Мексике, Израиле, Бразилии, Австралии, Украине.

В России в атмосферный воздух ежегодно выбрасывается огромное количество биогаза: примерно 1,1 млн т [8] (880 млн м³/год). Несмотря на это, работы по его утилизации ведутся крайне неудовлетворительно. Среди регионов с реализованными системами сбора и сжигания свалочного газа можно назвать Нижний Новгород, Самара, Хабаровск, Ленинградскую область. В Московской области системы внедрены на полигонах «Дашковка», «Каргашино», «Хметьево», «Дмитровский», «Тимохово», «Кучино».

В качестве примера рассмотрим полигон «Кучино», расположенный на территории городского округа Балашиха Московской области. За шесть десятилетий его площадь превысила 50 га, высота насыпи над естественным рельефом – более 50 м, объем накопленных отходов составляет почти 25 млн т. С 2017 г. полигон не действует, проводятся работы по его рекультивации.

Чтобы предотвратить несанкционированный выход свалочного газа, большая часть поверхности полигона закрыта геомембраной, а для его планового извлечения пробурено 112 скважин глубиной 30 м. Все скважины подключены к единому трубопроводу. Газ с помощью компрессо-

ров откачивается из тела полигона, транспортируется и с давлением 53–55 мбар нагнетается в горелки двух факельных установок, производительностью 1,5 и 2,5 тыс. м³ в час соответственно, где он сжигается с температурой 1 000–1 100°С.

На рисунке 2.5 показаны расположенные на полигоне «Кучино» компрессорная станция и одна из факельных установок, а на рис. 2.6 устройство этой факельной установки.

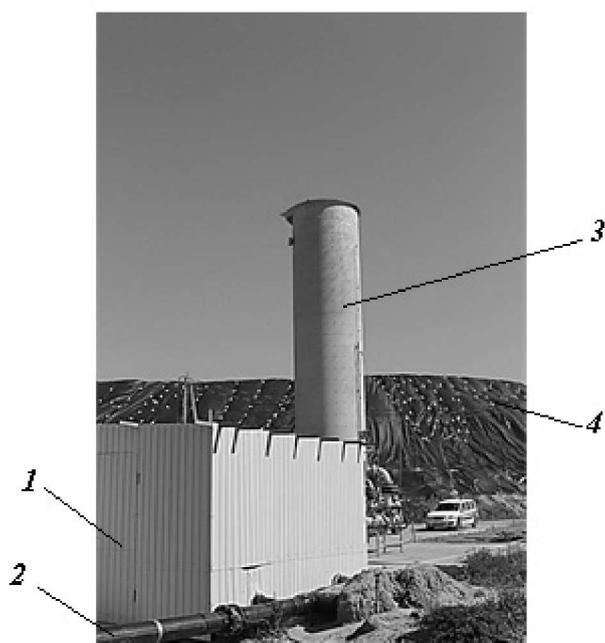


Рис. 2.5. Вид на компрессорную и факельную установку производительностью 2,5 тыс. м³ в час со стороны подвода свалочного газа:
1 – компрессорная; 2 – трубопровод свалочного газа; 3 – факельная установка;
4 – тело полигона, закрытое геомембраной



Рис. 2.6. Внутрикорпусные устройства факельной установки производительностью 2,5 тыс. м³ в час:
а – газораздающие трубы; б – горелочные насадки

В настоящее время на этом полигоне система сжигания представляет собой только систему экстренной дегазации с выбросом тепла в виде высокотемпературных продуктов сгорания в атмосферу без какой-либо их энергетической утилизации и очистки.

В тоже время экспертно можно оценить энергетический потенциал свалочного газа полигона «Кучино». Исходя из макросостава газа (55 об.% – метан и 45 об.% – CO₂), его теплота сгорания составляет примерно 20 МДж/м³. Объем образования биогаза оценен на уровне – 5 тыс. м³ в час [8]. Тогда суммарная тепловая мощность будет достаточно большой – примерно 20 МВт. Поэтому в дальнейшем на полигоне «Кучино» для энергетической утилизации свалочного газа планируется установка газопоршневых машин электрической мощностью 2 МВт, оснащенной газоочисткой и непрерывным мониторингом [8].

Рассматривая перспективы использования биогаза захоронений в качестве вторичных энергоресурсов в России, нужно иметь в виду следующее. Анализ опубликованных данных по реализованным отечественным проектам показывает, что энергетическое использование свалочного газа, без учета дополнительного финансирования за снижение выбросов парниковых газов, экономически нецелесообразно. Еще больше осложняет ситуацию отсутствие потребителя генерируемой энергии в непосредственной близости от полигона. Продажа же электроэнергии в городские сети из-за низких существующих тарифов крайне не выгодна.

Стоит также сказать, что не все полигоны России можно оборудовать установками по сбору биогаза. Иногда это не позволяет сделать проект, иногда это невозможно в связи с постоянными пожарами на полигоне, а сгоревшие отходы не производят биогаз. Также надо иметь в виду, что по мнению экспертов Агентства защиты окружающей среды США, энергетическая утилизация биогаза целесообразна на полигонах, содержащих не менее 1 млн т ТКО, т.е. не на всех полигонах, а лишь на тех, которые обслуживают города с населением более 100 тыс. человек.

Важным является также тот факт, что в настоящее время основной тенденцией в области обращения с ТКО является повсеместное сокращение полигонного захоронения, вплоть до полного его прекращения. Уже сейчас, благодаря интенсивному строительству в Европе новых и модернизации существующих предприятий для термической переработки отходов, повсеместному внедрению отдельного сбора и рециклингу ТКО, таким странам, как Швеции, Дании, Нидерландам, Германии, Бельгии, Австрии, Швейцарии и Норвегии, удалось достигнуть главной цели комплексной системы обращения с отходами: практически полному отказу от полигонного захоронения (рис. 2.7).

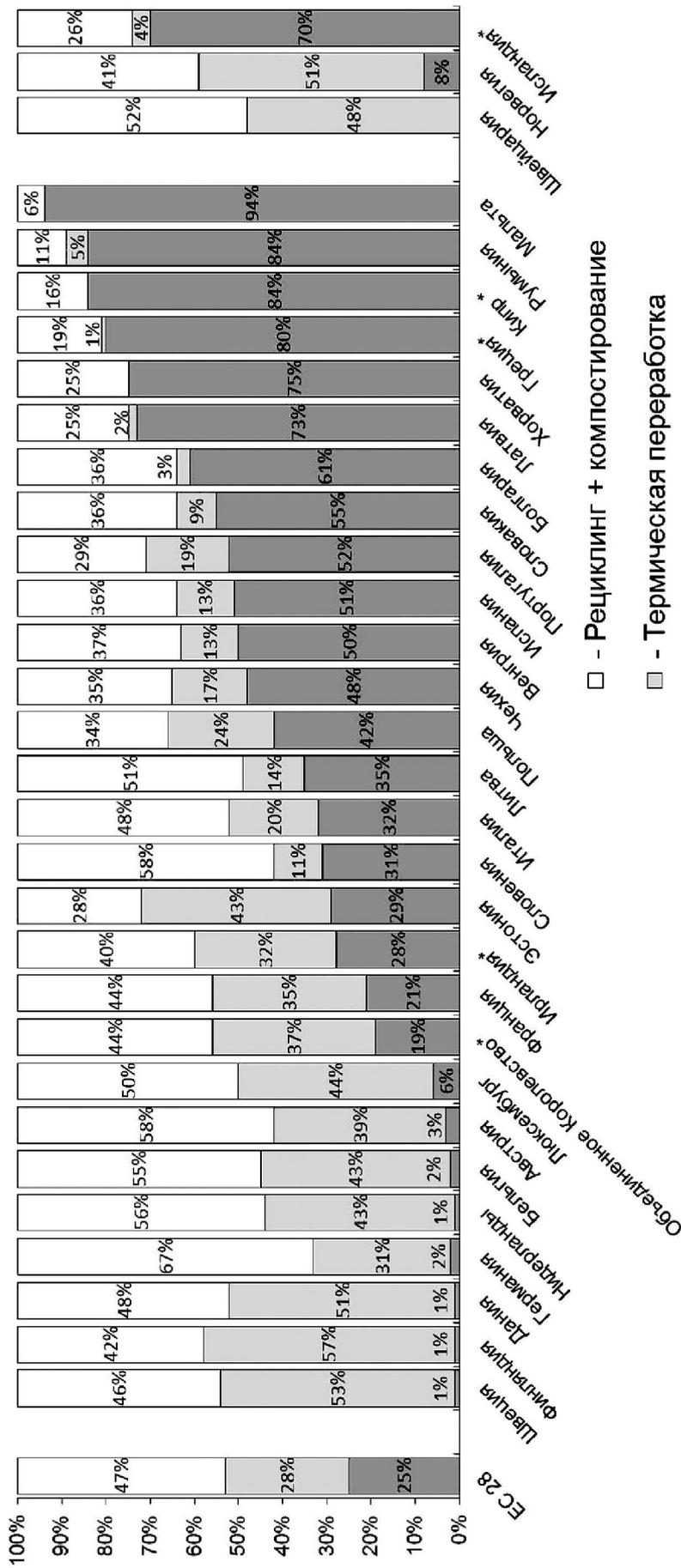


Рис. 2.7. Переработка ТКО в Европе в 2018³

³ – Latest Eurostat Figures: Municipal Waste Treatment 2018 [Text]: January 29, 2020. — Режим доступа: <https://www.cewer.eu/municipal-waste-treatment-2018/>

Стремясь к достижению нулевого захоронения, другие европейские страны также продолжают развивать переработку отходов – как во вторичные материалы, так и в энергию. Уже в 2017 г. более чем в половине стран Европы доля отходов, вывозимых на полигоны, не превышала 50% от общего количества. В Китае в настоящее время на полигоны вывозится менее 50% образующихся ТКО.

Все это говорит о том, что в конечном итоге свалок не будет и, следовательно, энергетическая утилизация биогаза захоронений, как возможный вариант использования ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов, будет просто не возможна.

2.2. Изготовление топлива из ТКО для последующего сжигания в энергетических котлах и в цементных печах

Использование топлива из отходов (RDF) энергоемкими отраслями позволяет сохранить природные виды топлива, снижает нагрузку на окружающую среду при его добыче, обработке и транспортировании. Кроме того, уменьшаются совокупные выбросы парниковых газов за счет того, что не происходит разложения отходов органического происхождения на объектах их захоронения с выделением метана в составе свалочного газа. (Как уже упоминалось, парниковый эффект углекислого газа, выделяющегося при сжигании ТКО, в 22 раза меньше парникового эффекта от эквивалентного количества метана).

Основной пользователь твердого топлива из отходов в настоящее время – цементная промышленность, которая является одной из самых энергоемких отраслей (в среднем около 40% себестоимости цементной продукции приходится на энергоносители) и, как следствие, вносящих существенный вклад в глобальное изменение климата (5% антропогенных выбросов парниковых газов в мире). RDF используют также в печах для обжига извести.

2.2.1. Основные технологии получения топлива из ТКО

Первоначально топливо из ТКО использовали для совместного сжигания с органическим топливом (углем) в энергетических котлах. Основными элементами системы первого поколения технологического процесса подготовки RDF являлись измельчитель ТКО (типа молотковой мельницы) и магнитный сепаратор, в котором удалялись черные металлы. Сепарация других материалов отсутствовала, и поэтому в котел поступали нежелательные, с точки зрения обеспечения эффективности технологического процесса, компоненты (стекло, хлорсодержащие вещества, тяжелые металлы и т.д.). Например, измельченные частицы стекла делают

топливо, поступающее в котел, весьма абразивным и усиливает шлакование топки. Кроме того, так как RDF, в основном, накапливалось в бункерах (а это, как и ТКО, весьма самоуплотняющийся и слеживающийся материал, см. разд. 1.4), при его извлечении из емкостей хранения возникали значительные проблемы с подачей топлива в котел.

Для решения последней проблемы в системах второго поколения на начальной стадии применяли грубое дробление отходов, а измельчение до требуемого фракционного состава выполняли непосредственно перед подачей RDF в котел. Это улучшило качество RDF, но не решило проблему присутствия нежелательных компонентов в нем. Следующим шагом было использование оборудования для сепарации мелких, не превышающих 38 мм компонентов, состоящих в большинстве из битого стекла, керамики и отсева, содержащего органику, которые вывозились на свалку. RDF складировалось предпочтительно на полу, а не в бункерах и подавалось ковшовым погрузчиком к лентам транспортера. Это значительно улучшило надежность подачи топлива к котлу.

В третьем поколении технологических систем подготовки RDF на начальной стадии подготовки устанавливали устройство для разрыва пакетов с отходами. Далее отходы направляли на барабанный грохот или тарельчатый сепаратор для отделения тяжелых компонентов с размерами менее 38 мм, которые вывозились на свалку. В некоторых системах для улавливания легких фракций (бумаги, пластика и т.д.) использовали воздушные сепараторы.

Таким образом, раньше подготовка RDF была одним из этапов подготовки ТКО к сжиганию в энергетических котлах и осуществлялась непосредственно на ТЭС.

В настоящее время процесс производства RDF является одной из технологических операций на предприятиях для механико-биологической переработки отходов (Mechanical Biological Treatment – MBT).

Механико-биологическая обработка отходов представляет собой серию механических и биологических технологических операций, целью которых является подготовка смешанных отходов для наилучшего возможного повторного использования каждого компонента ТКО. Таким образом, исходным продуктом процесса MBT являются ТКО, а на выходе – подготовленные к сжиганию отходы (RDF), стабилизированные в виде компоста или техногрунта продукты и извлеченные в процессе сортировки материалы, пригодные для дальнейшей утилизации (вторичные материальные ресурсы).

Биологическо-механическая обработка (Biological Mechanical Treatment – BMT) является разновидностью MBT, в которой биологическая фаза предшествует механической сортировке, т.е. просто меняется порядок обработки ТКО (рис. 2.8).

В Европе построено достаточно много установок для обработки ТКО на основе механико-биологической обработки. Действует более 330 объектов МВТ в Германии, Австрии, Италии, Швейцарии, Нидерландах, Великобритании, Испании.

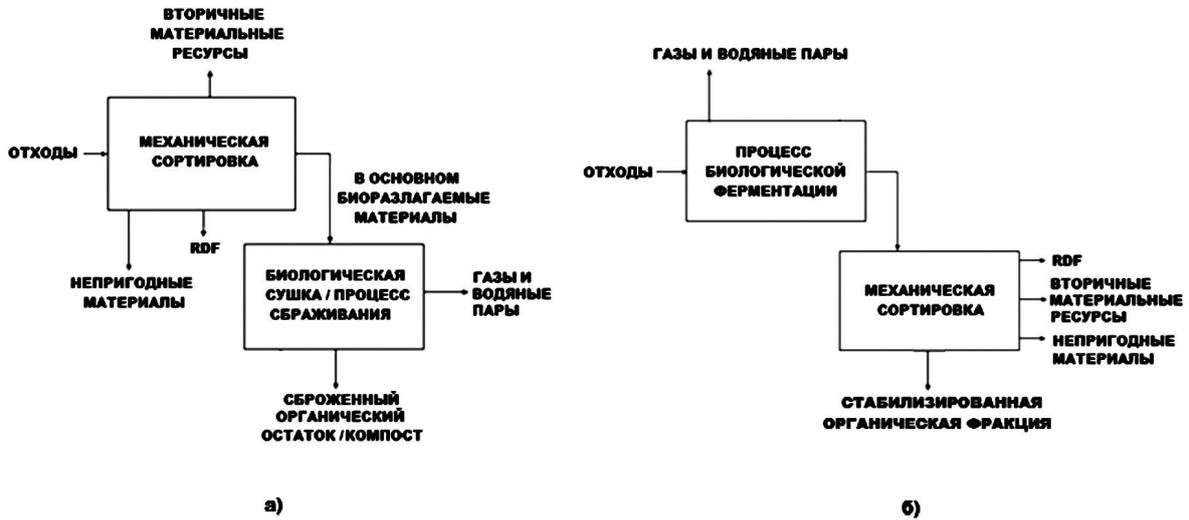


Рис. 2.8. Структурные схемы механико-биологической (МВТ) (а) и биомеханической (ВМТ) (б) обработки ТКО

На предприятиях МВТ, как правило, перед дальнейшей обработкой ТКО применяется предварительное грохочение отходов в целях разделения слипшихся компонентов отходов, отделения мелкой подситной фракции для последующей дальнейшей ее биообработки, усреднения отходов для равномерной подачи на сортировочный комплекс.

Выделенная органическая фракция ТКО биологически перерабатывается путем анаэробного сбраживания и/или аэробного компостирования.

На предприятиях МВТ почти всегда извлекают металлы (черные и цветные), и для многих подобных предприятий это единственные отходы, которые направляют на переработку для их повторного использования. Другие материалы, такие как текстиль, бумага/картон и пластмассы, обычно имеют более низкое качество, чем те, которые извлечены при отдельном сборе мусора, и, как правило, имеют более низкий потенциал для коммерческой реализации на рынке вторичных ресурсов. В первую очередь, это относится к материалам, выделенным из отходов, не прошедших биообработку, поскольку они загрязнены органикой, подверженной гниению, могут создавать сильные запахи и содержать патоген-

ные организмы. Именно поэтому наиболее рационально сортировку смешанных ТКО с выделением компонентов для RDF осуществлять после биосушки (на предприятиях ВМТ).

В качестве примера предварительной подготовки ТКО к дальнейшему использованию можно привести технологию, разработанную итальянской компанией A2A и получившей название ITS® (Intelligent Transfer Station – станция интеллектуального перемещения). Основу этой технологии составляет процесс аэробного сбраживания отходов, в ходе которого быстроразлагаемая органическая часть (подверженная сбраживанию фракция) в аэробных условиях выделяет тепло. Это тепло используется для сушки и обезвреживания отходов, обеспечивая более высокий уровень безопасности и гигиены труда во время последующей их обработки. (Следует отметить, что в традиционных технологиях МВТ аэробной обработке подвергается лишь мелкая (подрешеточная) фракция. Крупная (надрешеточная) фракция, также содержащая некоторые подверженные гниению частицы, такой обработке не подвергается).

После биосушки в процессе дальнейшей переработки из смешанных ТКО можно получить, %:

RDF для сжигания на цементных заводах.....	25–50
пластмассы	0–6
металлы	1–3
другие полезные фракции	0–6
высушенную и стабилизированную мелкую органическую фракцию (< 10 мм)	5–12
прочие непригодные материалы	4–10

Принципиальная схема обработки отходов для получения RDF после биосушки показана на рис. 2.9.

После биосушки, в результате которой вес отходов сокращается примерно на 25%, теплота сгорания повышается до 12–13 МДж/кг, влажность составляет примерно 18%, отходы с помощью питателей (1) или (2) попадают на реверсивный транспортер (3). Далее либо байпасом по транспортерам (32) и (33) могут направляться на пресс (34) для пакетирования и отправки потребителю (на захоронение), либо по транспортерам (4) и (5) подаваться на грохот 6 для отделения фракций менее 70 мм.

Крупная фракция (надрешеточный продукт) поступает на транспортер (7), над которым расположен магнитный сепаратор (23), и, после удаления черного металла, через реверсивный транспортер (8) направляется на одну из дробилок (24) для измельчения.

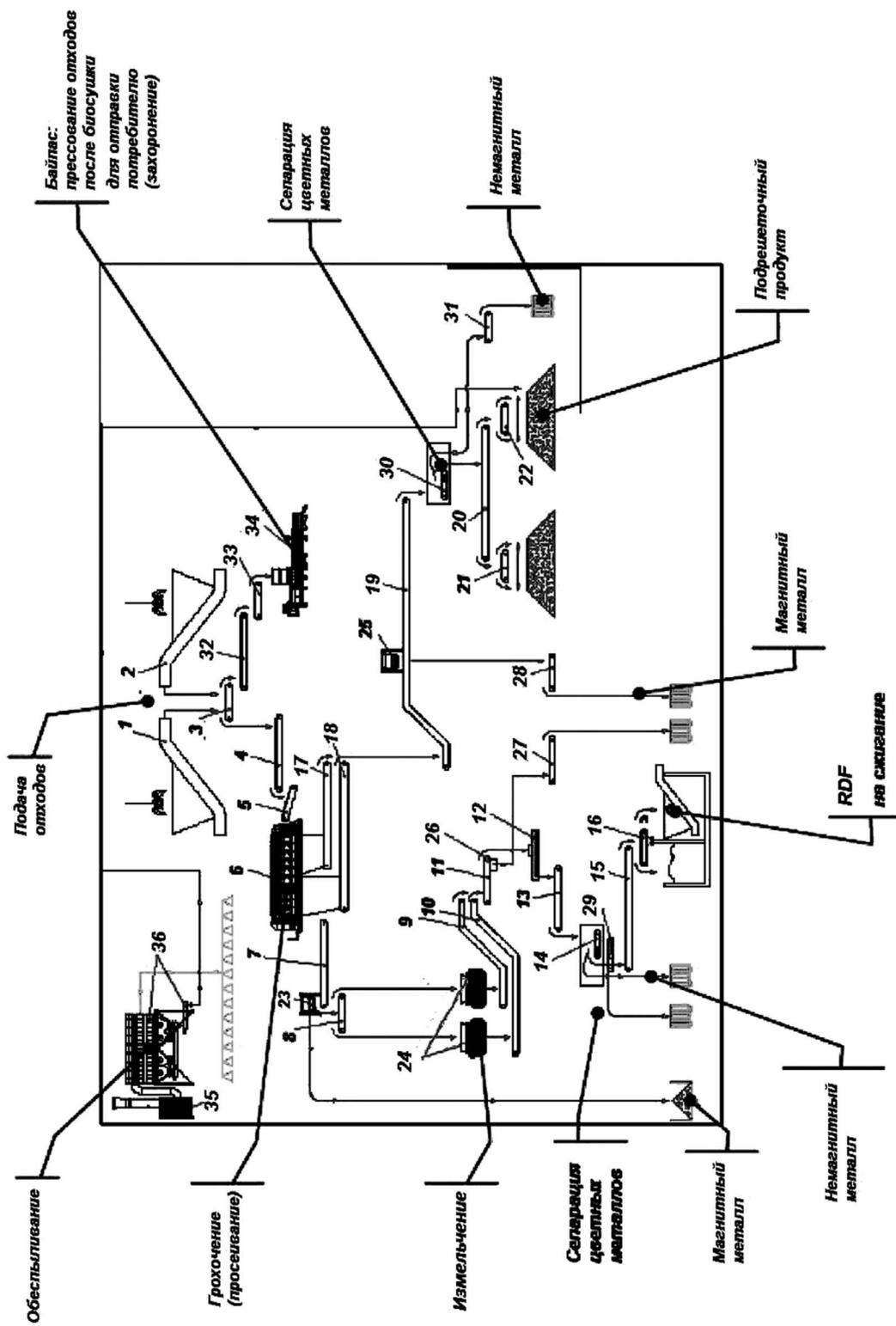


Рис. 2.9. Принципиальная схема обработки отходов для получения RDF (предприятие A2A в Cortecorona, Италия)

После измельчения отходы через систему транспортеров (9–15) попадают на реверсивный транспортер (16), который направляет поток полученного топлива RDF либо в промежуточный бункер, либо непосредственно на сжигание.

При прохождении отходов по транспортеру (11) происходит вторичное удаление магнитного металла с помощью металлоуловителя (26). Извлеченный черный металл транспортером (27) направляется в накопительный бункер. На транспортере (14) установлен сепаратор для улавливания цветных металлов (29).

Подрешеточный продукт (мелкая фракция) из грохота попадает на транспортеры (17, 18) и далее на транспортер (19), над которым установлен магнитный сепаратор (25). Извлеченный черный металл транспортером (28) подается в накопительный бункер. Между транспортером (19) и реверсивным транспортером (20) расположен сепаратор цветного металла (30). Извлеченный немагнитный металл попадает на транспортер (31) и далее в накопительный бункер. После реверсивного транспортера (20) мелкая фракция направляется на транспортеры (21) или (22) и выгружается в кучи.

Для аспирации и пылеулавливания служит рукавный фильтр (36), через который воздух прокачивается вытяжным вентилятором (35). За счет этого в помещении создается разрежение.

В процессе переработки высушенных отходов после биосушки образуется примерно 50% RDF, 10% металла и 40% мелкой фракции. Теплота сгорания RDF составляет 15–18 МДж/кг, влажность – 15%.

Опыт подготовки RDF показывает, что имеется зависимость между теплотой сгорания RDF и его процентным выходом из ТКО (табл. 2.2). Так, чем больше выход RDF, тем ниже его теплота сгорания.

Таблица 2.2

Влияние подготовки на выход RDF и его теплоту сгорания

Тип подготовки	Выход RDF, %	Теплота сгорания, кДж/кг
Без предварительной подготовки	100	11,2
С предварительным измельчением ТКО и сепарацией металла.	93	12,0
С предварительным измельчением ТКО, сепарацией металла и удалением фракций менее 38 мм	от 83 до 70	от 13,1 до 13,6
На предприятиях МВТ (ВМТ)	25–50	15–18

Выход RDF около 93% представляет собой систему подготовки, в которой удалены, в основном, только черные металлы. В то же время на предприятиях ВМТ теплота сгорания достигает 18 МДж/кг.

2.2.2. Сжигание топлива из отходов в энергетических котлах и цементных печах

Предварительная подготовка ТКО перед сжиганием, в которой отходы измельчаются, а удаляются только черные металлы, может быть весьма условно отнесена к производству RDF, поскольку продукт содержит много балласта: золы, немагнитных металлов, камней, керамики. ТКО, подготовленные в таких системах, могут быть использоваться как топливо только в слоевых топках с механическими решетками, однако преимущество такого сжигания, по сравнению со сжиганием неподготовленных отходов в тех же самых топках, не очевидно.

Опыт использования RDF, подготовленного в системах второго и третьего поколений, в качестве дополнительного топлива в энергетических котлах, сжигающих уголь, показал, что его расход на базовой тепловой нагрузке не может превышать 20% по теплу. В противном случае концентрация вредных веществ в уходящих газах существенно будет превышать нормативные предельные значения, возникает большая вероятность повреждения пароперегревателя из-за высокотемпературной хлористоводородной коррозии, ухудшается качество золошлаковых остатков (ЗШО).

В большинстве случаев RDF в энергетических котлах вдувается через специальные горелки, расположенные на боковых стенках топки на уровне пылеугольных горелок. В таких котлах большая часть RDF сжигается во взвешенном состоянии в зоне интенсивного тепловыделения, образованной угольным факелом. Однако более крупные и тяжелые фракции выпадают в нижнюю часть топки. Перед попаданием в систему удаления золы они дожигаются в дополнительной топке с решеткой, размещенной в центре холодной воронки. По описанной технологии RDF ранее сжигали в котлах конструкции B&W.

RDF также использовали при совместном сжигании с углем в циклонной топке, в которую RDF вводили с потоком вторичного воздуха, тангенциально движущимся внутри корпуса циклона. RDF находит применение как топливо в котлах с кипящим слоем (см. р. 3.2).

Но все же наиболее целесообразное и экономически оправданное его использование – это сжигание в цементных печах.

Вращающиеся обжиговые цементные печи – агрегаты, способные наряду с экономией органического топлива производить относительно безопасную утилизацию горючих отходов за счет:

- высокой температуры внутри печи (до 1 450°C);
- возможности нейтрализации тяжелых металлов и вредных веществ жидкой фазой клинкера;
- перемещения материала и дымовых газов в противотоке;
- очистки дымовых газов в существующей системе газоочистки после малозатратной ее реконструкции;
- отсутствия остатков сжигания – зола становится структурной составляющей портландцементного клинкера.

Технология производства цемента следующая. Исходное сырье подается в холодную верхнюю часть печи и в результате ее вращения и наклона постепенно перемещается к горячему нижнему концу. В этот конец подается для сжигания основное топливо (обычно угольный или нефтяной кокс). По мере продвижения сырья вдоль печи в режиме противотока газов и твердых веществ, который обеспечивает более высокую эффективность теплообмена, сырье нагревается, высушивается и подвергается высокотемпературным превращениям. В результате получается клинкер, состоящий из кусков переплавленного негорючего материала. Далее клинкер, выгружается из вращающейся печи, имея температуру около 1 000°C, и падает на охлаждающее устройство, обычно представляющее собой движущуюся решетку, через которую продувается охлаждающий воздух.

Клинкер перемалывается с гипсом и другими добавками (обычно на шаровой мельнице) до получения конечного продукта – цемента. Далее цемент из мельницы перемещается в крупноразмерные вертикальные бункеры в цехе отгрузки готовой продукции.

Таким образом, химический процесс производства цемента начинается с разложения известняка (т. е. карбоната кальция, CaCO_3) при температуре около 900°C для получения оксида кальция (CaO) с выделением углекислого газа (CO_2); этот процесс называют кальцинацией. Следующим этапом является процесс получения клинкера, в ходе которого CaO реагирует при высокой температуре (обычно 1 400–1 500°C) с кремнеземом, глиноземом и FeO , в результате чего образуются силикаты, алюминаты и ферриты кальция, которые составляют портландцементный клинкер. В результате измельчения этого клинкера совместно с гипсом и другими добавками и получается цемент.

Типичная производительность европейских печей составляет 3 000 тонн клинкера в сутки. Энергетические затраты обычно составляют 30–40% общих издержек производства.

Традиционно в качестве основного топлива в цементных печах сжигают уголь. Также используют другие виды органического топлива, включая нефтяной кокс, природный газ и нефть, или несколько видов топлива одновременно. Для очистки образующихся дымовых газов от твердых частиц цементные печи оснащаются электрофильтрами или тканевыми фильтрами. Устройства улавливания «кислых» газов на цементных печах обычно не используются, поскольку сырье для печей высокощелочное и само в значительной степени поглощает «кислые» газы. Выбросы NO_x снижают технологическими мероприятиями или селективным некаталитическим восстановлением путем впрыскивания аммиака.

При использовании RDF потребуется некоторая реконструкция газоочистки, объем которой определяется качеством RDF.

Цементный завод в зависимости от сырья и технологического процесса потребляет 3 000–6 500 МДж (не включая электричество и транспортировку) на тонну клинкера. Объем производства цемента в Европе составляет около 190 млн. т. в год. По оценкам специалистов около 50% потребления органического топлива в цементных печах могут быть заменены топливом из отходов. Тогда потенциальный европейский рынок сбыта RDF в цементную промышленность может быть оценен следующим образом: $(190 \cdot 10^6 \cdot 3\,000 / 20\,000) \cdot 0,5 = 14,25 \cdot 10^6$, т.е. не менее 14 млн т.

2.2.3. Перспективы использования топлива из ТКО в энергетике и промышленности

В таблице 2.3 приведены требования к топливу из отходов для его возможного использования в топливосжигающих установках, из которой видно, что цементные печи наименее чувствительны к качеству RDF.

Таблица 2.3

Требования к топливу из отходов для его использования в топливосжигающих установках (по данным [9])

Параметр	Единицы измерения	Цементные печи	Котлы с ТШУ для сжигания		Котлы с ЖШУ	Котлы с кипящим слоем
			каменных углей	Бурых углей		
Теплота сгорания	МДж/кг, средняя/макс.	11/22	13,5/18	13,5/18	17/22	13,5/18
Содержание Cl	%, средняя/макс.	от 0,5 до 1/3	0,5/1	от 0,4/0,5 до 0,7	1/2	0,4/1,4
Содержание Hg	мг/МДж (макс.)	от 0,08 до 0,33	0,065	0,085	0,034	0,028
Содержание Cd	мг/МДж (макс.)	6,9	1,21	0,42	0,25	0,63
Содержание тяжелых металлов суммарно	мг/МДж (макс.)	1 650	106	170	34	17

Примечание: ТШУ – твердое шлакоудаление; ЖШУ – жидкое шлакоудаление

Прежде всего, это касается требования к содержанию тяжелых металлов в RDF. Дело в том, что решающее влияние на концентрацию тяжелых металлов в необработанных газообразных продуктах горения оказывает температура сжигания, которая для некоторых установок указана ниже, °С.

Цементные печи.....	1 800–2 000
Котлы с ЖШУ.....	1 400–1 600
Котлы с ТШУ для сжигания каменных углей.....	1 000–1 400
Котлы с ТШУ для сжигания бурых углей.....	1 000–1 100
Котлы с кипящим слоем.....	900

В цементных и известковых печах, благодаря высокой температуре и характеру протекания в них процесса, тяжелые металлы почти полностью поглощаются расплавом шлаком (клинкером). Исключение составляют летучие соединения Hg и Tl. Тем не менее, и эти вещества улавливаются: соединения Tl конденсируются в циклоне подогревателя печи при температуре от 450°С до 550°С, а газообразные компоненты Hg – на твердых частицах в золоуловителе.

Таким образом, с точки зрения соблюдения экологических требований, наиболее приспособленными к сжиганию RDF считаются цементные печи.

Европейская ассоциация цемента определила виды отходов, которые могут применяться в качестве сырья для подготовки RDF⁴. Это изношенные шины автомобилей; бумажные и древесные отходы, пластмасса, ткани, пена полистирола; отработанные машинные масла; использованные растворители, клеи, лаки; нефтяные и угольные шламы.

Запрещены к использованию радиоактивные материалы; взрывчатые вещества; газы (сжиженные в том числе); отходы с большим содержанием хлора; отходы медицинской отрасли.

Одним из проблемных отходов для получения RDF с точки зрения экологической безопасности Европейская ассоциация цемента считает ТКО. Сложность применения RDF из ТКО состоит еще в том, что производство цемента – это химическая технология, стабильность которой является основным фактором выпуска высококачественной продукции, поэтому RDF из ТКО, поступающее на цементные заводы в виде гомогенизированного продукта, должно, в том числе, иметь определенное значение теплоты сгорания.

Установленные в некоторых европейских странах требования к RDF для использования на цементных заводах приведены в табл. 2.4.

⁴ – [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://greenologia.ru/othody/utilizaciya-i-pererabotka/cement.html#i-2>

**Требования к RDF для использования на цементных заводах
в Европе [4]**

Страна	Теплота сгорания, МДж/кг	Зольность на рабочую массу, %	Влажность, %	Содержание хлора, %	Содержание серы, %
Италия	15	≤ 20	≤ 25	0,9	0,6
Швеция	17	≤ 10	≤ 15	н/д	н/д
Великобритания	16,5–17	12–17	10–15	н/д	н/д
	17	15	11	н/д	н/д
	17	13–18	8–15	0,28	0,23

Для зарубежных исходных смешанных ТКО с достаточно высокой теплотой сгорания – 11,2 МДж/кг, как показано в табл. 2.2, удается получить RDF с требуемой теплотой сгорания: 15–18 МДж/кг.

Теплота сгорания российских ТКО находится на уровне 8 МДж/кг (см. р. 1.5), и, следовательно, вряд ли можно прогнозировать, что полученное RDF будет выше 13 МДж/кг. Это ниже европейских требований к RDF, используемых на цементных заводах Европы.

При замещении традиционного топлива на RDF, изготовленное из ТКО, надо учитывать еще одно важное обстоятельство: весь зольный остаток сожженного RDF включается в цементный клинкер и таким образом становится частью продукта. Для определения возможной доли топлива из ТКО в общем объеме топлива без снижения качества цементного клинкера следует иметь в виду, что зола RDF изменяет соотношение между основными оксидами. Для обеспечения требуемого качества цемента необходим учет количества основных оксидов CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, привносимых с золой RDF. Считается, что без ущерба для качества клинкера доля топлива из ТКО в смеси топлив может составлять всего 15–20% при условии качественной подготовки этого RDF с предсказуемым составом и характеристиками. Для смешанных несортированных отходов это не всегда является возможным или экономически целесообразным. Этим во многом объясняется тот факт, что даже в Европе ежегодно утилизируются чуть более 350 тыс. т топлива из ТКО. В то время как потенциальный европейский рынок сбыта этого RDF в цементную промышленность может быть оценен в 4–12 млн т в год.

Таким образом, зарубежный опыт, показывающий относительно низкую востребованность топлива из ТКО, даже для цементной промышленности, с одной стороны, и значительные затраты на получения

такого топлива из отечественных ТКО с требуемыми характеристиками, с другой стороны, свидетельствуют о том, что в России этот способ использования ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов вряд ли получит широкое применение.

2.3. Термическая переработка ТКО с выработкой тепловой и электрической энергии

Наиболее перспективным и широко распространенным в мире вариантом применения ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов является их использование в качестве основного топлива на предприятиях для термической переработки (огневого обезвреживания) путем их непосредственного сжигания или сжигания после предварительной газификации и/или пиролиза с преобразованием выделяемого тепла в тепловую и электрическую энергию

2.3.1. Существующая ситуация в мире

В мире устойчиво прослеживается тенденция увеличения количества отходов, утилизируемых термическим способом [10]. Сейчас в мире эксплуатируется примерно 2 450 предприятий для термической переработки ТКО общей производительностью 368 млн т отходов в год. Прогнозируется, что к 2028 г. количество предприятий для термической переработки ТКО составит около 2 700 общей мощностью более 530 млн твердых коммунальных отходов в год.

В Европе за 5 лет (с 2012 по 2017 гг.) объем ТКО, перерабатываемых термическим способом, увеличился более чем на 20% (табл. 2.5). В 2017 г. эксплуатировалось 492 предприятия для термической переработки ТКО, на которых ежегодно сжигается почти 96 млн т ТКО.

В США ежегодно сжигается около 30 млн т ТКО с производством более 17 ТВт-ч электроэнергии в год.

В Японии из примерно 41–42 млн т ТКО, образующихся ежегодно, около 78% перерабатывается термически, причем 70% всех отходов с преобразованием их энергопотенциала в тепловую и электроэнергию. Всего в Японии сейчас около 1 100 предприятий для термической переработки отходов, в том числе, примерно 330 предприятий, на которых ТКО утилизируют с выработкой электроэнергии. Их суммарная установленная мощность превышает 1,7 ГВт.

Китай в 2020 г. термически перерабатывал почти 50% всех образующихся в стране ТКО. В эксплуатации находится примерно 400 заводов общей мощностью около 126 млн т ТКО. По прогнозам Международного энергетического агентства, к 2023 г. установленная электрическая мощность китайских предприятий по энергетической утилизации отходов достигнет 13 ГВт, а к 2025 году подобные предприятия смогут перерабатывать до 260 млн т ТКО.

Таблица 2.5

Термическая переработка ТКО в Европе

Страна	Количество заводов					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Австрия	13/2,9	13/2,9	11/2,4	11/2,5	11/2,5	11/2,6
Бельгия	18/3,6	18/3,5	18/3,3	18/3,4	18/3,41	17/3,4
Великобритания	25/5,7	26/6,1	32/7,9	37/8,48	37/9,96	40/10,89
Венгрия	1/0,4	1/0,36	1/0,38	1/0,38	1/0,35	1/0,35
Германия	80/21,3	81/21,9	99/25,0	99/25,0	96/26,0	96/26,8
Голландия	12/7,5	12/7,5	12/7,6	12/7,57	12/7,8	12/7,6
Дания	26/3,3	27/3,3	26/3,5	26/3,58	26/3,47	26/3,4
Испания	11/2,3	11/2,1	12/2,5	12/2,5	12/2,88	12/3,0
Италия	46/5,2	45/5,8	43/6,3	40/6,11	41/6,21	39/6,11
Ирландия	1/0,2	1/0,22	1/0,22	1/0,23	1/0,23	2/0,48
Литва	—	1/0,15	1/0,14	1/0,18	1/0,26	1/0,25
Люксембург	1/0,1	1/0,13	1/0,13	1/0,15	1/0,16	1/0,17
Норвегия	17/1,5	16/1,6	17/1,58	17/1,63	17/1,61	18/1,63
Польша	1/0,05	1/0,04	1/0,04	1/0,04	5/0,5	6/0,8
Португалия	3/1,0	3/1,1	3/0,97	4/1,14	4/1,2	4/1,2
Словакия	2/0,17	2/0,17	2/0,19	2/0,19	2/0,29	2/0,23
Финляндия	5/0,45	6/0,82	9/1,2	9/1,2	8/1,47	9/1,61
Франция	128/13,6	127/14,5	126/14,7	126/14,7	126/14,4	126/14,4
Чехия	3/0,7	3/0,6	3/0,64	3/0,66	4/0,7	4/0,7
Швейцария	30/3,9	30/3,8	30/3,8	30/3,89	30/4,0	30/4,01
Швеция	32/5,2	32/5,3	33/5,7	33/5,62	34/5,99	34/6,1
Эстония	—	1/0,18	1/0,22	1/0,22	1/0,24	1/0,22
Всего:	455/79,07	458/82,07	482/88,41	485/89,37	488/93,63	492/95,95
Примечание: в числителе – количество заводов; в знаменателе – количество ТКО, переработанных термическим способом, млн т/год						

В Корее эксплуатируется 35 заводов с отпуском энергии потребителю, на которых перерабатывается около 5 млн тонн ТКО.

Предприятия для энергетической утилизации ТКО планируются или находятся в стадии строительства и в других странах Азиатско-Тихоокеанского региона, в том числе, в Таиланде, Филиппинах, Индонезии, Мьянме, Малайзии. В 2018 г. построили первый завод во Вьетнаме.

Один из крупнейших заводов по термической переработке ТКО был пущен в эксплуатацию в Сингапуре в 2000 г., обеспечивающий производительность 4 300 т ТКО в сутки. В 2019 г. в этом островном государстве был введен еще один новый завод по выработке энергии из отходов – шестой по счету. Его мощность завода составляет 1,3 млн т отходов ежегодно.

В Нью-Дели в 2017 г. было введено в эксплуатацию крупнейшее в стране предприятие для термической переработки ТКО с отпуском электроэнергии мощностью 24 МВт. К 2027 г. в Индии планируют построить еще несколько подобных предприятий, общей производительностью по ТКО около 1,5 млн т в год.

В Тегеране (Иран) в феврале 2015 был официально открыт завод по сжиганию ТКО мощностью 64 тыс. т в год. В Катаре в 2011 г. введен в эксплуатацию завод производительностью примерно 500 тыс. т ТКО в год (1 500 т/сутки) с турбиной мощностью 40 МВт. Крупнейший в мире завод, производительностью 5 500 т отходов в сутки и мощностью 185 МВт, строится в Дубае. Предприятия по выработке энергии из отходов сооружаются в Стамбуле ежегодной производительностью по ТКО 1 млн т и в Мексике – 1,6 млн т. Шесть объектов планируется запустить к 2027 г. в Австралии. Первая в Африке установка для сжигания мусора уже введена в эксплуатацию в Аддис-Абебе (Эфиопия).

2.3.2. Процессы в основе технологий термической переработки ТКО

Можно выделить три базовых процесса термической переработки отходов, имеющих различную физическую природу: сжигание, пиролиз и газификация. По сути, все существующие технологии используют один из этих процессов или их комбинацию.

Сжигание – это уничтожение отходов методом организованного горения – регулируемой реакции окисления с образованием пламени. Химическая энергия органических компонентов необратимо превращается в тепловую энергию, которая может быть утилизирована и направлена потребителю или преобразована в электроэнергию. Неорганические компоненты превращаются в зольный остаток.

На сегодня самым распространенным способом реализации управляемого сжигания ТКО является слоевое сжигание на механической колосниковой решетке.

Газификация – это процесс частичного (избирательного) окисления, при котором органические вещества превращаются в смесь газов, главным образом, водорода и монооксида углерода.

В процессе требуется газифицирующий агент, в качестве которого обычно служит воздух или кислород и водяной пар.

Получаемая при газификации смесь газов (синтез-газ) может непосредственно без очистки сжигаться в котле или после очистки в камере сгорания газовых турбин или газопоршневых двигателях. Правда следует отметить, что реализованных проектов, в которых синтез-газ, образующийся в процессе газификации отходов, используется в газотурбинном цикле, нет, а единичные пилотные установки со сжиганием синтез-газа в газопоршневых двигателях имеют малую производительность.

Пиролиз – это термическое разрушение углеродсодержащего материала при полном отсутствии кислорода или при его незначительном количестве. Продуктами пиролиза являются пиролизный газ, углеродный остаток и жидкие продукты.

Пиролиз отличается от газификации и сжигания, которые являются автотермическими реакциями, тем, что полностью протекает за счет энергии, сообщаемой через стенки реактора.

Все существующие технологии термической переработки ТКО используют процесс сжигания. Только большая часть (95%) непосредственно сжигают поступающие отходы, а примерно 5% применяют ступенчатое сжигание: на первой стадии переработки отходов с помощью пиролиза или газификации получают синтез-газ, который далее сжигается в составе интегрированной установки.

2.3.3. Структура современного предприятия для термической переработки ТКО

Конечная цель большинства предприятий для термической переработки ТКО – отпуск потребителю тепловой и электрической энергии. В этой связи такие предприятия, как уже говорилось, по существу являются ТЭС, на которых основным топливом являются ТКО (ТЭС на ТКО).

Структура такой ТЭС представлена на рис. 2.10.

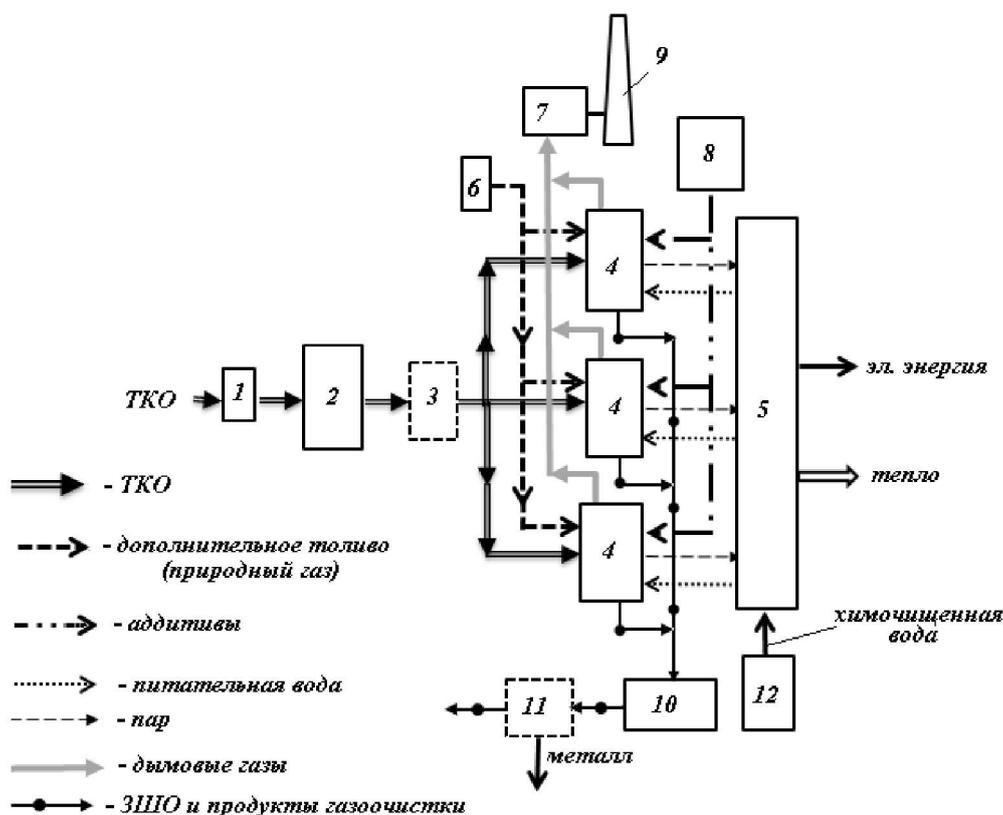


Рис. 2.10 Структурная схема ТЭС на ТКО (показана для трех ТЛ):

1 – весовая; 2 – помещение для разгрузки мусоровозов с приемным бункером ТКО;
 3 – участок подготовки отходов; 4 – технологические линии (оборудование для термической переработки отходов); 5 – энергетический комплекс; 6 – ГРП; 7 – система мониторинга газовых выбросов; 8 – цех подготовки аддитивов; 9 – дымовая труба;
 10 – отделение сбора и хранения твердых остатков от переработки ТКО;
 11 – цех переработки твердых остатков; 12 – водоподготовительная установка

Кроме оборудования для термической переработки отходов (технологических линий – ТЛ) в состав ТЭС на ТКО входят также [1]:

- весовая;
- приемное отделение с помещением для разгрузки мусоровозов и бункером ТКО;
- участок подготовки отходов в случае сжигания отходов в кипящем слое или для технологий с использованием процессов газификации и пиролиза;
- энергетический комплекс, предназначенный для преобразования тепловой энергии пара в электроэнергию и организации отпуска тепла потребителю;

- водоподготовительная установка с коррекционной обработкой воды;
- отделение сбора, временного хранения и переработки твердых остатков от сжигания;
- система мониторинга газовых выбросов;
- цех подготовки аддитивов (реагентов для системы газоочистки, материалы, необходимые для термического процесса и т.д.);
- административно-бытовой корпус, склады, стоянки и другие помещения для инженерного обеспечения ТЭС (ГРП, компрессорная, очистные сооружения и т.д.).

В случае прямого сжигания ТКО (рис. 2.11) в состав каждой ТЛ входят котельный агрегат (топка 2 и котел-утилизатор 3), система газоочистки (поз. 4. и 5) и вспомогательное оборудование (тягодутьевые машины, воздухоподогреватели, горелки, системы удаления провала из-под решетки, ЗШО и продуктов газоочистки).

На предприятиях для термической переработки с использованием процессов пиролиза или газификации каждая технологическая линия дополнительно включает в себя либо пиролизную установку (на рис. 2.12 это пиролизный вращающийся барабан 4), либо газификатор (см. рис. 3.22, поз. 2). Безусловно, технология термической переработки ТКО влияет на состав газоочистки и набор вспомогательного оборудования.

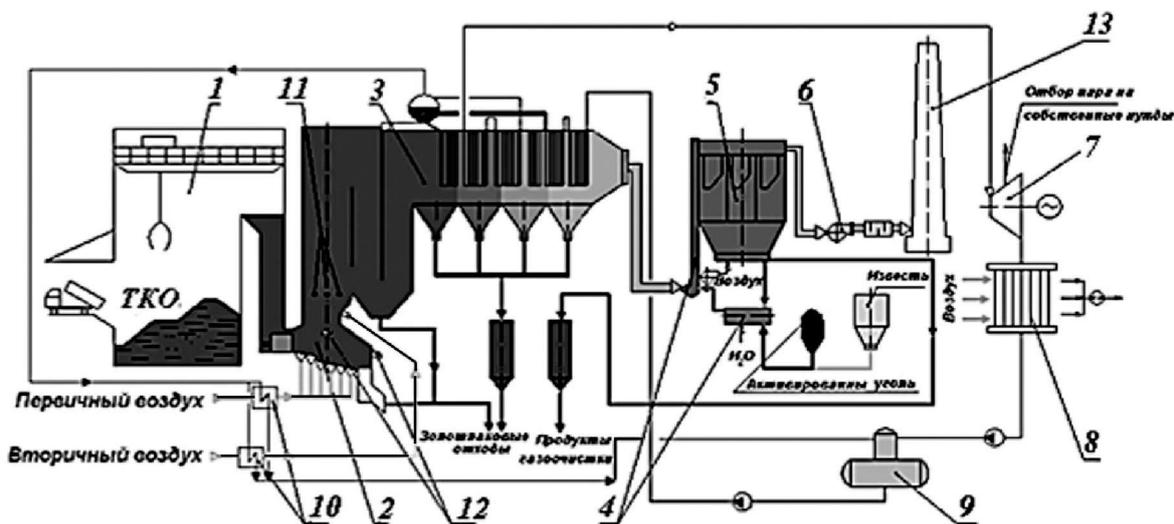


Рис. 2.11. Принципиальная технологическая схема слоевого колосникового сжигания ТКО с отпуском электроэнергии:

- 1 – приемный бункер ТКО; 2 – топка; 3 – котел; 4 – реактор со смесителем-увлажнителем; 5 – рукавный фильтр; 6 – дымосос; 7 – турбина;
- 8 – воздушный конденсатор; 9 – деаэратор; 10 – воздухоподогреватели;
- 11 – ввод карбамида; 12 – газовые горелки; 13 – дымовая труба

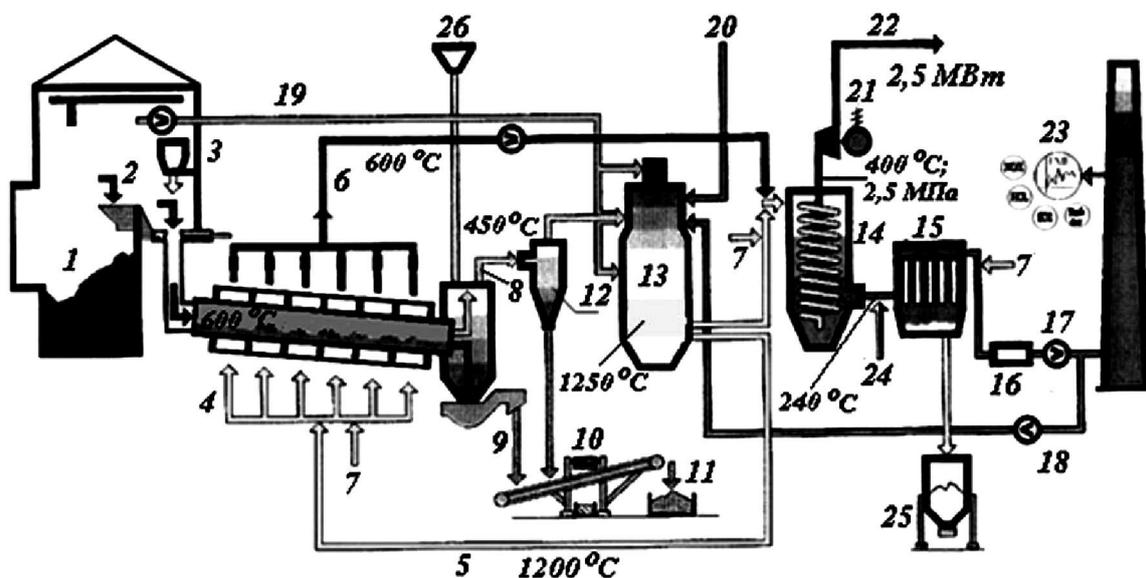


Рис. 2.12. Принципиальная схема технологии термической переработки ТКО методом пиролиза в г. Бургау (Германия)

- 1 – бункер ТКО; 2 – дробилка; 3 – подача извести; 4 – пиролизный вращающийся барабан; 5 – подвод дымовых газов на обогрев барабана; 6 – отвод дымовых газов; 7 – подача аммиака; 8 – пиролизный газ; 9 – твердые остатки; 10 – металлоуловитель; 11 – бункер-накопитель твердых остатков; 12 – циклон; 13 – камера сгорания; 14 – котел-утилизатор; 15 – тканевый рукавный фильтр; 16 – катализатор; 17 – дымосос; 18 – дымосос рециркуляции дымовых газов; 19 – дутьевой воздух; 20 – свалочный газ; 21 – турбогенератор; 22 – тепло для обогрева теплиц; 23 – система мониторинга газовых выбросов; 24 – подача смеси извести и активированного угля; 25 – бункер-накопитель продуктов газоочистки; 26 – предохранительный клапан

2.3.4. Описание типовой технологии термической переработки ТКО с отпуском энергии потребителю

Рассмотрим процесс термической переработки ТКО на примере словесного колосникового сжигания (рис. 2.11).

Мусоровозы проходят через автовесовую, где проводится учет и контроль поступающих ТКО, и направляются в приемное отделение на разгрузку. Для накопления, складирования и подготовки ТКО к сжиганию в приемном отделении предусмотрен приемный бункер (1), емкость которого обеспечивает 3-х суточный запас по ТКО. Бункер обслуживается двумя мостовыми электрическими грейферными кранами (один рабочий, один резервный). В бункере идет процесс гомогенизации ТКО путем их перемешивания грейфером, удаление крупногабаритных отходов, случайно попавших в бункер, и последующая загрузка ТКО в топку котла (2) через загрузочную воронку.

Из воронки ТКО через подающую течку поступают в питатель, а затем в автоматическом режиме подаются на механическую колосниковую решетку топki котла (в зону горения). Работу питателя и решетки регулируют в зависимости от производительности завода и характеристик ТКО (влажность, морфологический состав, удельный вес и др.).

Под решетку вентилятором подается первичный воздух, который может быть нагрет до 150°C в паровом (10) и до 250°C в газовом (на рис. 2.11 не показан) подогревателях, установленных после вентилятора. С целью исключения восстановительных зон и для дожигания СО поток газов на входе в первый газоход котла подвергается интенсивному перемешиванию с вторичным воздухом, который также при необходимости подогревается в паровом подогревателе (10) до 100°C.

Для стабилизации горения при сжигании отходов с низкой теплотой сгорания, а также для растопки котла используют газовые горелки (12). До начала подачи ТКО в топку (перед загрузкой первой партии ТКО при розжиге), а также до полного сгорания последней партии отходов, температура в топочной камере поддерживается этими горелками на уровне не ниже 850°C.

Неработающие горелки охлаждаются воздухом, который потом сбрасывается в топку. В топку также направляется воздух, используемый для охлаждения ее боковых стен.

Из топki продукты сгорания ТКО и природного газа поступают в радиационные газоходы котла, где происходит утилизация их тепла. Выработываемый насыщенный пар из барабана частично направляется на паровые воздухоподогреватели первичного и вторичного воздуха (10). Основная часть пара перегревается в пароперегревателях и поступает на турбину (7).

Для очистки дымовых газов от оксидов азота в первый газоход котла впрыскивают карбамид (11). В качестве транспортирующего агента для его впрыска используют пар из отбора турбины.

В топку подается также фильтрат, образующийся в приемном бункере. Следует отметить, что фильтрат – это влага, выделившаяся из ТКО в небольших количествах, и поскольку она уже учтена в исходном составе отходов, то при равномерной подаче фильтрата в топку он не оказывает практически никакого влияния на топочные процессы и работу газоочистного оборудования.

В котле осуществляется осаждение части твердых частиц летучей золы из газового потока.

Газообразные продукты сгорания ТКО после котла-утилизатора проходят многоступенчатую очистку, основными элементами которой в данном случае являются реактор со смесителем-увлажнителем (4) и рукавный фильтр (5). В смеситель-увлажнитель подают следующие реагенты: известь, активированный уголь и продукты газоочистки из рукавного фильтра, все это перемешивается и увлажняется водой. Подача извести и воды в смеситель осуществляется с помощью регуляторов, поддерживающих заданные значения температуры и концентраций HCl, HF и SO₂.

Удаление продуктов газоочистки из рукавного фильтра осуществляют с использованием технологии кипящего слоя. Для создания эффекта кипения золы, в нижнюю часть рукавного фильтра подают некоторое количество подогретого в электронагревателях воздуха. Продукты газоочистки пневмокамерными насосами направляют в специальный бункер-накопитель.

Очищенные дымовые газы дымососом (6) через шумоглушитель поступают в дымовую трубу (13).

Технологические процессы сжигания ТКО и газоочистки эксплуатируются и управляются с помощью автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Структура энергетического комплекса определяется видом отпускаемой во внешние сети энергии, который в свою очередь зависит от местных условий (наличия потребителя), существующих в стране тарифов и ряда других обстоятельств.

Тепловая схема ТЭС на ТКО обычно выполняется с поперечными связями, т.е. объединяет пар от технологических линий в общем паропроводе, из которого потом этот пар распределяется на турбину (турбины) и на тепловые нужды. Также как и для традиционных ТЭС, к основным узлам, обеспечивающим работу всей тепловой схемы, относятся:

- главные паропроводы высокого давления и пускосбросные устройства;
- конденсатный тракт;
- деаэратор и питательный тракты высокого давления;
- трубопроводы пара собственных нужд;
- система замкнутого контура охлаждения;
- центральный тепловой пункт, включающий систему подогрева сетевой воды городского теплоснабжения и систему подогрева сетевой воды для отопления и горячего водоснабжения помещений ТЭС;
- трубопроводы обессоленной воды для восполнения потерь в цикле.

Характерной особенностью тепловой схемы ТЭС на ТКО является наличие оборудования, которое не используется на традиционной ТЭС или используется редко.

Так, например, при сжигании ТКО, требуется подогрев дутьевого воздуха, часто до температуры 150°C и выше. Поскольку применить обычный воздухоподогреватель, входящий в состав котла, не представляется возможным, используют паро-воздушные теплообменники, в котором происходит подогрев воздуха паром из барабана котла.

Для системы конденсации отработанного в турбине пара и его охлаждения с целью исключения парения и экономии воды в условиях городской застройки на современных ТЭС на ТКО используют, как правило, воздушно-конденсационные установки (ВКУ). Основу современных воздушных конденсаторов ведущих зарубежных производителей составляют высокоэффективные оребренные трубы, имеющие эллиптическую форму и расположенные в один ряд, а электродвигатель вентилятора имеет регулируемое число оборотов.

Общий вид ВКУ представлен на рис. 2.13, описание в [1].

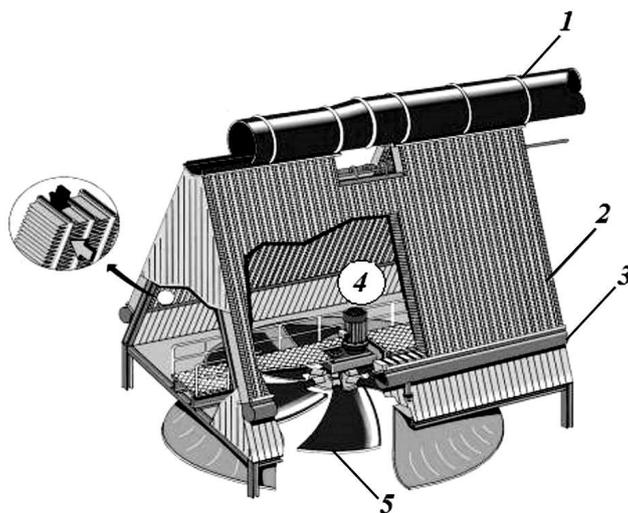


Рис. 2.13. Модуль ВКУ фирмы SPX для ТЭС на ТКО:

1 – паровой коллектор; 2 – теплообменная поверхность; 3 – коллектор конденсата;
4 – электродвигатель; 5 – вентилятор

Применяемые технологии термической переработки ТКО с выбором оптимальной для ТЭС на ТКО изложены далее в разд. 3, а возможные схемы энергетической утилизации генерируемого пара и вопросы повышения энергоэффективности ТЭС на ТКО – в разд.4.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные направления использования ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов.
2. Какие основные компоненты входят в состав биогаза захоронений? Какая в среднем его теплота сгорания и от чего она зависит?
3. Назовите основные способы утилизации биогаза захоронений. Почему факельное сжигание этого газа на полигонах приравнивают к утилизации?
4. Почему использование свалочного газа является бесперспективным направлением энергетической утилизации ТКО.
5. Какие основные технологии применяют для получения топлива из ТКО? Как влияют эти технологии на выход RDF и его теплоту сгорания?
6. Назовите основные требования к топливу из отходов для возможного его сжигания в котлах и цементных печах.
7. Почему топливо из ТКО находит ограниченное применение в цементных печах? Оцените целесообразность и перспективы его использования в энергетических котлах.
8. Какие основные элементы входят в структуру современной ТЭС, основным топливом которой являются ТКО?
9. Что входит в состав технологической линии для термической переработки ТКО?
10. Опишите процесс термической переработки ТКО на примере слоевого колосникового сжигания.

3. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ. НАИЛУЧШИЕ ДОСТУПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Апробированными методами термической переработки ТКО являются слоевое сжигание на механических колосниковых решетках, в кипящем слое, а также комбинированные технологии с использованием процессов пиролиза и газификации.

Другие методы (сжигание во вращающихся барабанных и металлургических печах, переработка с использованием плазмотронов) находят ограниченное применение, как правило, на установках небольшой мощности.

3.1. Слоевое сжигание на колосниковой решетке

3.1.1. Общие сведения о процессе сжигания в слоевых топках

Топки слоевого сжигания используются для сжигания как подготовленных (RDF), так и неподготовленных твердых отходов на различных колосниковых решетках. По способу обслуживания топки подразделяются на ручные и механизированные. В зависимости от относительного положения отходов и решеток, а также от типа последних различают топки с неподвижным слоем на неподвижной решетке, с относительным перемещением отходов вдоль неподвижных решеток и с подвижными колосниковыми решетками.

Топки слоевого сжигания с неподвижным слоем на неподвижной колосниковой решетке применяют в котлах малой мощности, как правило, с ручным обслуживанием и периодической загрузкой отходов (преимущественно бумажных и древесных). Топка содержит решетку из чугуновых колосников, под которую с помощью вентилятора подают воздух, используемый для сжигания отходов. В колосниках имеются отверстия для прохода воздуха круглого или щелевидного сечения, расширяющиеся вниз с тем, чтобы исключить застревание в них проваливающегося шлака. Отношение площади отверстий к общей площади колосников (относительное живое сечение) составляет 0,25–0,4.

В топках с неподвижными наклонными решетками с перемещающимся слоем отходов горение отходов происходит на наклонно установленных колосниковых решетках, под которые подают воздух. По мере выгорания топливо скатывается на подпирющие (слабонаклонные или горизонтальные) дожигательные решетки, под которыми располагается золовой бункер. Подача свежих отходов на неподвижные наклонные решетки осуществляется с помощью дозатора через вертикальную шахту из загрузочного бункера.

В таких топках, как и предыдущих можно сжигать древесные или бумажные отходы, а также RDF. Сжигание неподготовленных отходов может привести к образованию сводов в вертикальной шахте и ее забиванию, а также к застреванию отходов на наклонных колосниках из-за содержания в них проволоки, текстиля и т.п. или из-за увеличения слоя шлака на подпирающих колосниках.

Самым распространенным и наиболее отработанным методом сжигания ТКО является сжигание в топках с *подвижными (механическими) колосниковыми решетками*.

Такие топки достаточно эффективно обеспечивают:

1) сжигание ТКО переменного состава с постоянно меняющимися теплотехническими характеристиками;

2) механизированное перемещение подсушиваемых и горящих отходов и транспортирование ЗШО в тракт шлакоудаления;

3) шуровку ТКО при их подсушке, аэрацию при горении и предотвращение шлакования топки в зоне слоя;

4) равномерное распределение ТКО по ширине полотна решетки и обеспечение необходимой высоты слоя;

5) оптимальное распределение воздуха по зонам горения;

6) сбор и удаление материала, проваливающегося сквозь колосниковое полотно.

Устройство топки с механической колосниковой решеткой понятно из рис. 3.1.

ТКО, подлежащие сжиганию, обычно переносят краном к загрузочной воронке 1. Отходы проходят через загрузочную шахту и с помощью питателя 2 поступают непосредственно на подвижную решетку 3. Загрузочная шахта отделяет топочную камеру от окружающего воздуха за счет слоя отходов, находящихся в шахте и воронке. В качестве защитной меры в загрузочной шахте устанавливается заслонка, которая автоматически перекрывает горловину воронки в нештатных ситуациях, а также при пусках и останове котла и прекращении подачи ТКО в топку.

Конфигурация топочной камеры обеспечивает необходимую для сжигания температуру, достаточное время пребывания продуктов сгорания в топке и их перемешивание.

Колосниковая решетка обеспечивает транспортировку сжигаемых отходов в пределах топки, его шуровку и перекрывает топочную камеру со стороны нижнего подвода воздуха.

В слое отходов на колосниковой решетке происходят следующие процессы: прогрев и сушка, выход летучих, воспламенение (зажигание) и горение, дожигание в шлаке несгоревшего топлива (рис. 3.2).

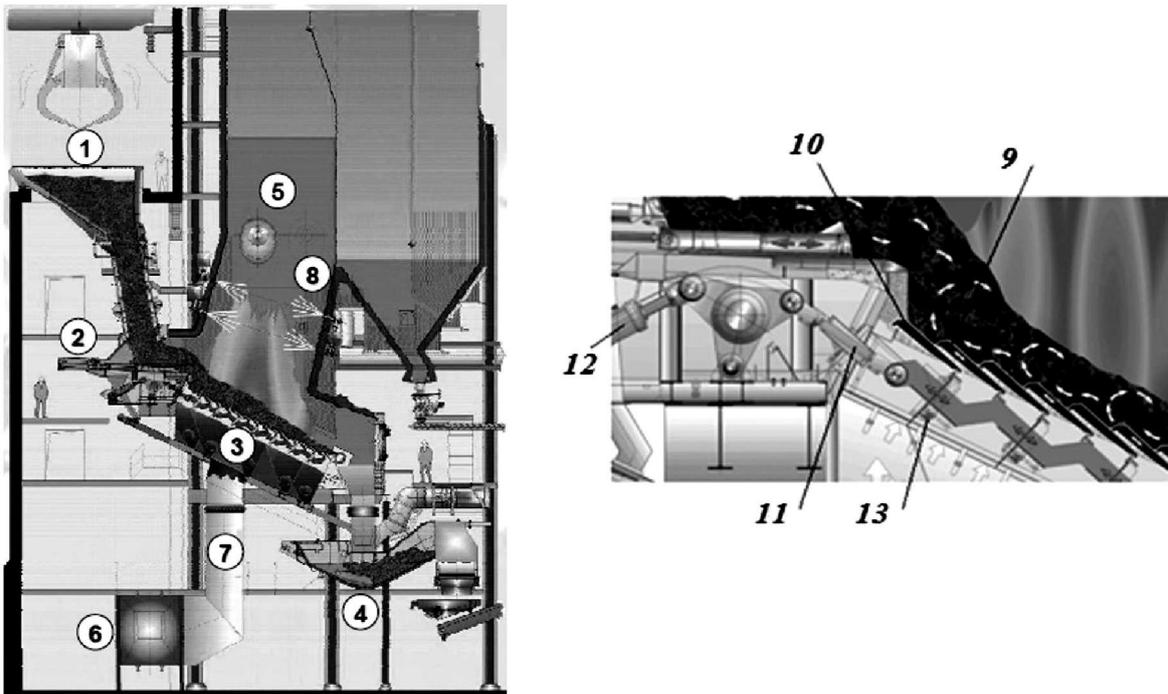


Рис. 3.1. Топочное устройство с обратно-переталкивающей решеткой фирмы Martin:

- 1 – загрузочная воронка; 2 – питатель; 3 – механическая колосниковая решетка; 4 – шлаковыгрузатель; 5 – топочное устройство; 6 – паровой воздухоподогреватель; 7 – первичный воздух; 8 – вторичный воздух; 9 – подвижная ступень колосников; 10 – неподвижная ступень колосников; 11 – подвижная рама; 12 – гидроцилиндр; 13 – скользящая опора

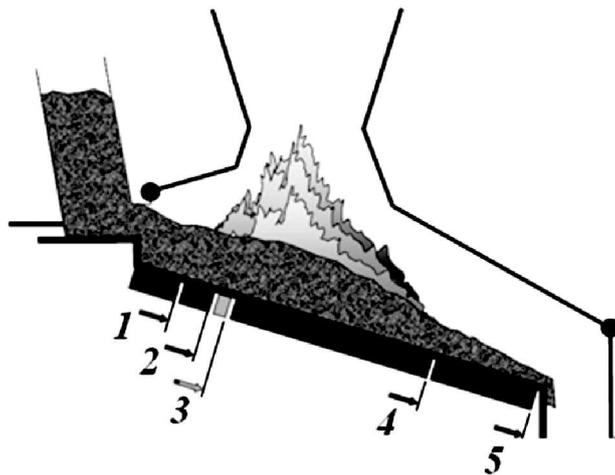


Рис. 3.2. Сжигание ТКО в топке с переталкивающей колосниковой решеткой:

- 1 – зона прогрева и сушки; 2 – зона выхода летучих веществ; 3 – зона воспламенения и горения летучих веществ; 4 – зона основного горения; 5 – зона дожигания

В слоевых энергетических топках при сжигании однородного органического топлива, например, угля определенной марки, протекание этих процессов происходит в определенных зонах с вполне различимыми границами. При сжигании в слоевых топках ТКО, из-за значительной неоднородности состава последних, в одних и тех же зонах слоя для разных компонентов ТКО могут одновременно протекать разные процессы. Например, выход летучих из некоторых составляющих ТКО (пластмассы, полиэтилен и т.п.) может начинаться еще в зоне прогрева и сушки основной массы отходов. Поэтому границы между зонами слоя являются весьма условными, а области протекания различных процессов могут пересекаться.

Зоны в слоевых топках, сжигающих ТКО, можно определить, исходя из преобладающего для основной массы ТКО процесса, и разделить их конструктивно (по валкам, по ступеням, по каскадам и т.д.), с тем, чтобы организовать протекающий в этой зоне процесс оптимально. Это достигается регулируемой подачей воздуха в каждую зону, расположением газогорелочных устройств, местом подвода газов рециркуляции и т.д. Характеристика различных зон приводится ниже.

Зона прогрева и сушки. Прогрев и сушка ТКО происходит на колосниковых решетках под воздействием тепла, выделяемого излучением, тепла, подводимого с подогретым первичным воздухом, а также, конвективного тепла дымовых газов, движущихся навстречу слою отходов. В некоторых конструкциях топки используется рециркуляция дымовых газов с температурой около 350°С с подачей их в слой отходов. Сушка отходов должна сопровождаться их шуровкой, поскольку в противном случае на поверхности отходов образуется твердая корка, препятствующая прохождению окислителя (воздуха). В конце сушки начинается процесс выделения и воспламенения летучих некоторых компонентов ТКО.

Зона подготовки к воспламенению (выхода летучих). В этой зоне за счет тепла, передаваемого от дутьевого воздуха и топочных газов, осуществляется дальнейший нагрев подсушенных отходов и выход летучих веществ, которые сгорают над слоем. В зависимости от температуры и скорости нагрева, этот процесс может сопровождаться образованием жидких продуктов пиролиза, в частности, негорючей пирогенетической влаги, наличие которой отрицательно влияет на процессы воспламенения и горения ТКО. Поэтому правильный выбор температуры подогрева воздуха, подаваемого в эту зону слоя, играет большую роль в общей работоспособности топочного устройства.

Зона воспламенения и горения. В слоевых топках различают верхнее воспламенение (зажигание) под воздействием тепла, излучаемого топоч-

ными газами и нагретыми сводами топки, нижнее воспламенение за счет подвода тепла с нагретым до высокой температуры воздухом, подаваемым под слой, и сплошное воспламенение за счет теплопередачи от горячей части отходов. Верхнее воспламенение может осуществляться также за счет лучистого тепла, подводимого от вспомогательного горелочного устройства, работающего на дополнительном топливе (газ, мазут).

Как правило, в механических слоевых топках, сжигающих ТКО, имеет место одностороннее верхнее воспламенение, так как дутьевой воздух обычно имеет температуру не более 300°C, а роль горящих дальше на решетке отходов в зажигании свежего топлива мала. Исключения составляют топки с обратными переталкивающими колосниковыми решетками.

Для интенсификации воспламенения применяют такие меры как повышение температуры дутьевого воздуха и увеличение площади контакта горючих компонентов с окислителем, за счет шуровки слоя. Лучшему зажиганию отходов способствует также приближение к зоне подготовки топлива потока топочных газов из области высоких температур в надслоевом пространстве путем создания над задней частью решетки выступающего в топку наклонного свода.

После воспламенения процесс горения протекает в твердом слое (на колосниковой решетке) и в объеме топочного пространства. Сгорание сопровождается выделением тепла, за счет которого продолжают выделяться и сгорать летучие.

Зона выгорания (дожигания). Заключительной стадией термической обработки ТКО является стадия выгорания (дожигания), в ходе которой происходит коксование и выгорание коксового остатка. Для горения в этой зоне необходимы сравнительно небольшие количества дутьевого воздуха, глубокая шуровка слоя, хороший контакт отходов с окислителем, время пребывания и температура, достаточные для сгорания отходов. Основное горение происходит в слое топлива на колосниковой решетке. При этом высота слоя уменьшается, растет его воздухопроницаемость (если отсутствует расплавление и спекание) и возможно увеличение температуры колосников от излучения из топки при их оголении. Чтобы повысить надежность решетки и снизить температуру колосников, на концевом участке часто устанавливают шлакосниматели способствующие накоплению шлака в зоне выгорания (увеличению высоты слоя шлака), а также подают в эту зону воздух в количестве больше требуемого для горения, чтобы охлаждать колосники. В некоторых топках в качестве зоны дожигания используют вращающийся барабан.

При сжигании ТКО потребность в воздухе по длине решетки меняется: в ходе прогрева и сушки, и в зоне дожигания она минимальна, а в зоне, где происходит горение летучих и кокса она наибольшая.

При общем (несекционированном) подводе воздуха под решетку вследствие уменьшения сопротивления слоя отходов его расход по мере выгорания возрастал бы и использовался не эффективно. Поэтому пространство под полотном решетки разбивают на секции (дутьевые зоны) с индивидуальным регулируемым подводом воздуха в каждую зону. Это позволяет подавать воздух в соответствии с развитием процесса горения и снижать средние по длине решетки избытки воздуха.

К слоевым колосниковым топкам, предназначенным для сжигания ТКО, предъявляются технические требования, как связанные с обеспечением надежной работы котла, так и обусловленные нормами экологического контроля. В частности, чтобы избежать шлакования в топке, необходимо ограничить верхний предел температуры в топке, т.е. не допускать размягчения золы отходов при 1050°C – 1100°C . Снижать температуру на выходе из топки ниже 800°C также не рекомендуется, так как при этом имеет место существенный химический и механический недожог. Необходимо также выдерживать обязательное требование по снижению концентраций токсичных органических компонентов в продуктах сгорания ТКО: образующиеся при их сжигании дымовые газы, для разложения канцерогенных полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов (ПХДД/ПХДФ), должны выдерживаться при температуре не ниже 850°C и при содержании кислорода не менее 6% в течение более двух секунд.

Обеспечение указанных технических требований зависит от ряда конструктивных и режимно-эксплуатационных факторов, влияющих на процессы, происходящие в топке с колосниковыми решетками. К ним, прежде всего, относятся:

- конструкция колосниковых решеток;
- аэродинамика (конфигурация) топочной камеры;
- конструкция стен и сводов топочной камеры;
- компоновка горелок;
- система обеспечения воздухом для горения.

3.1.2. Конструкции колосниковых решеток

Колосниковая решетка (КР) обеспечивает шуровку ТКО и подачу очаговых остатков в тракт шлакоудаления. Это достигается перемещением отдельных колосников или их рядов, ступеней относительно друг

друга, а также соответствующим наклоном полотна решетки и, в ряде случаев, расположением отдельных ее ступеней уступами. Форма и размеры колосниковых решеток, величина их взаимного перемещения определяется, исходя из свойств ТКО (в том числе – степени подготовки отходов к сжиганию), производительности сжигательной установки, ее функционального назначения, а также экологических требований к шлаку и летучей золе.

К колосниковым решеткам, предназначенным для сжигания ТКО, предъявляются следующие требования:

1) надежная работа при загрузке неподготовленных ТКО с постоянно меняющимися морфологическим и фракционным составами;

2) возможность эксплуатации при температуре в топочном объеме выше 800–850°C;

3) нечувствительность к легкоплавким металлическим составляющим (олово консервных банок, отходы из алюминия и т.д.);

4) конструкция КР должна обеспечивать равномерное поступление воздуха к сжигаемым отходам и предусматривать возможность автономно его регулировать в направлении движения ТКО;

5) скорость движения решетки должна регулироваться по отдельным секциям в пределах зон зажигания, активного горения и выжигания топлива;

6) конструкция колосников и каналов для прохода воздуха должны исключать возможность заклинивания подвижных колосников металлическими предметами, содержащимися в ТКО. Крепления колосников должны обеспечивать быструю и легкую их замену.

Учитывая тяжелые условия работы колосников, их выполняют обычно из жаростойких и износостойких сплавов с высоким содержанием хрома и стремятся к тому, чтобы первичный воздух более полно омывал тело колосника, способствовал очистке воздушных каналов и зазоров между колосниками от проваливающихся сквозь решетку частиц.

КР оборудуется устройством для сбора и транспортировки провала очаговых остатков из всех зон решетки. Это устройство должно обеспечивать герметичность дутьевых зон, а его детали и узлы должны обладать износостойкостью по отношению к шлаку ТКО, обладающего сильными абразивными свойствами.

Для уменьшения абразивного износа боковых стен в зоне слоя на высоту до 1–1,5 м от поверхности КР устанавливают защитные плиты из износостойкого покрытия (например, карборунда).

К настоящему времени распространение на средних и крупных установках, сжигающих ТКО, получили следующие типы механических КР: переталкивающая колосниковая решетка (ПКР); обратная переталкивающая колосниковая решетка (ОПКР) и валковая колосниковая решетка (ВКР).

Переталкивающая колосниковая решетка. ПКР состоит из отдельных чередующихся неподвижно закрепленных и подвижных, перекрывающих друг друга в направлении перемещения ТКО колосниковых секций. Воздух для горения поступает в слой ТКО через щели между колосниками и/или отверстия в торцевой поверхности колосников. Подвижные колосники секции совершают возвратно-поступательное движение с длиной хода примерно 150 мм.

В установках средней и большой производительности полотно ПКР обычно состоит из нескольких секций (модулей). Это позволяет создавать колосниковые решетки различной производительности из небольшого числа стандартных модулей, с минимальными затратами времени и средств на изготовление и монтаж, а также осуществлять независимое управление каждой секцией. В качестве примера на рис. 3.3. показана ПКР конструкции «Von Roll», состоящая из двух модулей по ширине.

Полотно решетки этой конструкции располагается под углом 19° к горизонтали. Перемещение ТКО в сторону выгрузки шлака в основном осуществляется за счет движения колосников, установленных на несущей конструкции (тележке), которая опирается на ролики, приводимые в движение стандартными гидроцилиндрами.

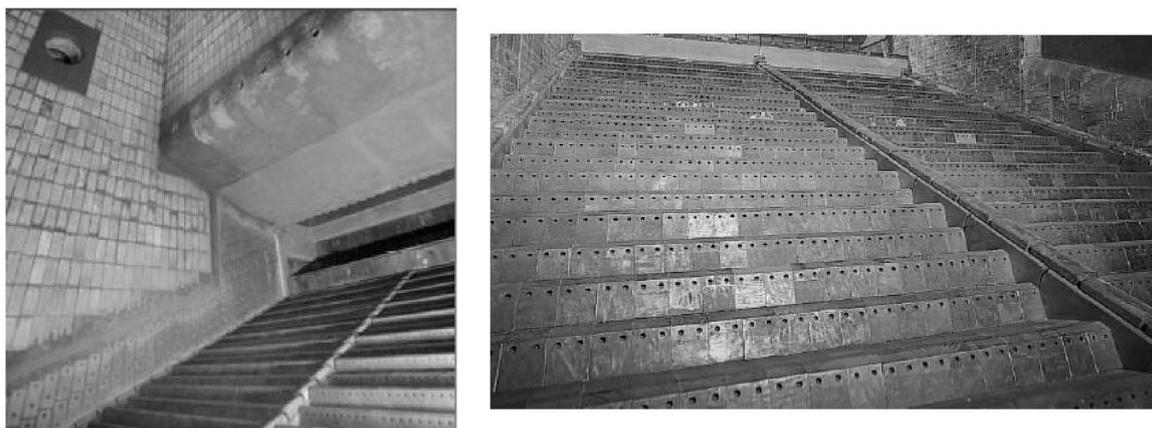


Рис. 3.3. ПКР конструкции фирмы «Von Roll»

С помощью ПКР удастся получить хороший эффект шуровки при интенсивном переворачивании отдельных частей ТКО, что уменьшает неравномерность выгорания за счет различных скоростей сгорания отдельных фракций ТКО и снижает вероятность, так называемого

«кратерного горения» (разрыв сплошного фронта горения на отдельные очаги). В результате перемешивания быстро и медленно горящих частей ТКО достигается сравнительно равномерное их выгорание.

Обратно переталкивающая колосниковая решетка. ОПКР имеют наиболее сложную кинематическую схему движения колосников, обеспечивающую постоянное перемещение отходов из основной зоны горения по направлению к началу решетки. Это обеспечивает интенсификацию процесса сушки и воспламенения, создавая очаги нижнего зажигания массы лежащих на колосниках отходов. В результате на решетке происходят все фазы процесса (сушка, выделение летучих, воспламенение, горение, выгорание) одновременно.

Типичным примером ОПКР является решетка системы Martin (рис. 3.1), которая имеет поочередно расположенные неподвижные и подвижные ступени колосников. Только в отличие от ПКР подвижные колосники осуществляют обратно-переталкивающее движение, позволяя подавать 15–30 % горячей массы отходов навстречу движущемуся слою.

Данная решетка расположена с наклоном в сторону выгрузки шлака, большим по сравнению с ПКР (угол наклона составляет 26°), поэтому остальная масса отходов (70–85%) под действием собственного веса медленно перемещается к выходной части решетки, интенсивно перемешивается и дожигается. Это способствует интенсификации процесса сушки и воспламенения, созданию очагов нижнего зажигания массы лежащих на колосниках отходов. Подвижные элементы решетки перемещаются механизмами, приводимыми в движение гидравлическими приводами, с помощью которых можно изменять скорость перемещения колосников в соответствии с характеристикой сжигаемых отходов.

Выгоревшие остатки (шлак) захватываются медленно вращающимся валиком, который регулирует толщину слоя. Затем шлак падает в шлаковую ванну, откуда удаляется специальным скребковым транспортером.

ОПКР разделена на зоны, в каждую из которых подается необходимое количество воздуха, соответствующее свойствам сжигаемых ТКО и регулируемое специальным механизмом с заслонками. Все клапаны открываются автоматически одним сервомотором.

ОПКР более эффективна по сравнению с ПКР при сжигании высоковлажных отходов, так как сжигание ТКО на ОПКР происходит более интенсивно за счет нижнего зажигания ТКО.

Общим отрицательным моментом в работе ОПКР и ПКР является высокая степень износа колосникового полотна вследствие трения подвижных и неподвижных ступеней КР, а также трения между колосни-

ками и ТКО, что приводит к необходимости периодической замены колосников. Применительно к условиям эксплуатации в России этот недостаток усугубляется тем, что ТКО содержит значительное количество проволоки, тяжелых металлических предметов и т.п.

Валковая колосниковая решетка. ВКР (рис. 3.4) может состоять из шести или семи валков диаметром 1,5 м длиной до 6 м (длина валка зависит от производительности установки по ТКО).

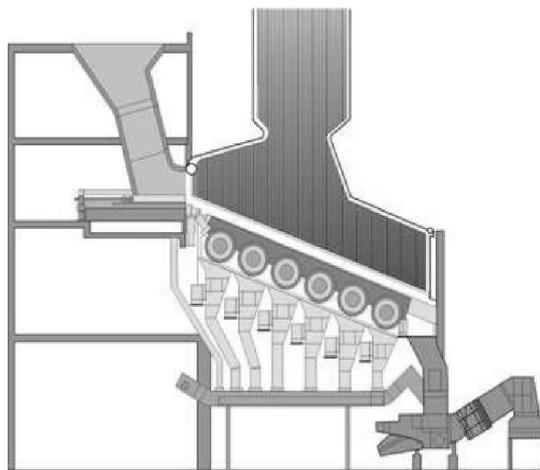


Рис. 3.4. Валковая колосниковая решетка

Валки расположены на разной высоте и имеют горизонтальную ось вращения. Валки изготовлены из чугуновых колосников, насаженных на цилиндрический каркас, который крепится на пустотелом валу. Такая конструкция позволяет передать каждому из валков большой крутящий момент, что является одним из преимуществ этого вида КР.

Каждый вал имеет бесступенчатую регулировку скорости вращения, благодаря чему процесс горения поддерживается в соответствии со свойствами поступающих ТКО. Одновременно путем изменения скорости передвижения удается равномерно сжигать ТКО по всей длине КР.

Сушка и подготовка к сжиганию ТКО происходят на первом и частично на втором валках, интенсивное горение – на следующих валках, а выжигание – на двух последних валках.

Подшипники пустотелого вала и его приводные механизмы расположены вне топочной камеры, что позволяет легко их контролировать и обслуживать. Ни одна из деталей привода не находится в условиях высокой температуры и запыленности. Все части, подлежащие смазке, доступны во время эксплуатации. Валки оснащены электроприводом и вращаются обычно со скоростью 1–11 об./час.

Одним из преимуществ данного типа решетки является то, что только 50% площади поверхности валка обращена к топке; остальная часть

находится в зоне обдува первичным воздухом, т.е. большая часть валка находится в зоне невысокой температуры. Решетка не чувствительна к таким компонентам ТКО, как проволока, тяжелые и громоздкие куски железа и т.д., так как колосники не движутся относительно друг друга, как, например, у ПКР и ОПКР. Кроме того, у ВКР меньше по сравнению с ПКР и ОПКР износ от трения, поскольку отходы не скользят по валкам, и соответственно больше срок службы валков.

Конструктивные трудности вызывает уплотнение зазоров между валками; живое сечение решетки составляет 12% всей площади поверхности. Для уплотнения обычно используют щетки из стального каната.

В таблице 3.1 указаны преимущества и недостатки рассмотренных типов колосниковых решеток.

Таблица 3.1

**Преимущества и недостатки наиболее часто применяемых
для сжигания ТКО типов колосниковых решеток**

№	Тип КР	Преимущества	Недостатки
1	Переталкивающая КР	<ol style="list-style-type: none"> 1. Хорошая шуровка слоя ТКО 2. Минимальное живое сечение по воздуху 3. Провал через колосники минимален 4. Равномерное распределение воздуха по всей площади КР 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая степень износа колосникового полотна вследствие трения подвижных и неподвижных частей КР, а также из-за трения КР и ТКО 2. Сложность кинематической схемы 3. Работа колосников в зонах высоких температур
2	Обратно переталкивающая КР	<ol style="list-style-type: none"> 1. Хорошая шуровка слоя ТКО 2. Минимальное живое сечение по воздуху 3. Провал через колосники минимален 4. Равномерное распределение воздуха по всей площади КР 5. Возможность нижнего зажигания поступающих ТКО 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокая степень износа колосникового полотна вследствие трения подвижных и неподвижных частей КР, а также из-за трения КР и ТКО 2. Сложность кинематической схемы 3. Работа колосников в зонах высоких температур 4. Необходимость выдерживать угол наклона КР
3	Валковая КР	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствие трения между валками, а также между валками и ТКО 2. Низкие тепловые нагрузки колосников из-за периодического охлаждения валков потоком первичного воздуха 3. Простота в обслуживании, доступность во время эксплуатации и ремонтпригодность 4. Хорошая шуровка ТКО 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Живое сечение больше, чем у ПКР и ОПКР, что приводит к увеличению провала 2. Конструктивные трудности уплотнения зазоров между валками

3.1.3 Фирмы-поставщики и технические характеристики современных колосниковых решеток для сжигания ТКО

Фирмы-поставщики и технические характеристики современных КР для сжигания ТКО представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Фирмы-поставщики и технические характеристики колосниковых решеток для сжигания ТКО

Фирма-поставщик	Название решетки (фирма-разработчик)	Тип решетки	Производительность, т/ч	Угол наклона, град	Примерное количество изготовленных решеток
Martin GmbH (Mitsubishi Heavy Industries)	Martin (Martin)	ОПКР	1,7–50	26	940
	Vario (Martin)	ОПКР	10–40	26	
	SITY 2000 (Alstom)	ОПКР	5,5–28	24	
	W&E (Widmer + Ernst)	ПКР	1,9–36	0–5	
Hitachi Zosen Inova	Von Roll (Von Roll)	ПКР	3–38	19 (10*)	500
Babcock & Wilcox Volund A/S (Keppel Seghers)	Volund (Volund)	ПКР	3–35	12/7,5	500
	Dyna Grate® (Braun & Sorensen)	ПКР	4–44	25	
Fisia Babcock Environment GmbH	Steinmuller	ПКР	4–50	12,5	59
	Noell	ПКР	4–12	6/0	
	Babcock	Валковая	7–40	20/25/30	
Doosan Lentjes	Lentjes (Kablitz)	ПКР	8,5–30	10/0	35
	Babcock	Валковая	8–28	20/25/30	
Baumgarte Boiler Systems GmbH	Koch (Koch + Kunzle)	ПКР	9,8–33	10	20
Termomeccanica	Revi Tec	ПКР	4–24,8	10/0	15
JFE Engineering Corporation	Hyper Grate Stoker (JFE)	ПКР	3–21	0	280
Kawasaki Heavy Industries	Advanced stoker system (Kawasaki Heavy Industries)	ПКР	0,5–25	Нет данных	165

Примечание: * – модернизированная конструкция.

Мировыми лидерами в области создания и поставки сжигательного оборудования для сжигания ТКО на колосниковых решетках являются фирмы Martin GmbH, Hitachi Zosen Inova (HZI), Babcock & Wilcox Volund A/S, Fisia Babcock Environment GmbH и Doosan Lentjes (более 75% от общего количества).

Фирма Martin GmbH в настоящее время поставляет решетки четырех типов: классическую ОПКР (конструкция показана на рис. 3.1), усовершенствованную ОПКР – Vario, ОПКР конструкции Alstom под маркой SITY 2000 и ПКР горизонтального типа конструкции Widmer + Ernst.

Головной образец классической ОПКР, описание которой приведено ранее, производительностью примерно 6 т/ч был установлен в Бразилии, Sro Paulo-Ponte Pequena в 1959 г. В конце 2020 г. на разные предприятия были поставлены более 615 решеток данного типа.

Дальнейшим развитием конструкции решетки Martin является решетка Vario® (рис. 3.5, а), которая была специально разработана для топлив с высокой теплотой сгорания и / или с низким содержанием инертного вещества (например, после предварительной обработки ТКО). Решетка разделена по длине на три секции, каждая из которых имеет индивидуальный привод. Это позволяет регулировать скорость подачи отходов по зонам, и, тем самым, контролировать процесс их горения в зависимости от характеристик сжигаемых отходов. Головной образец решетки успешно работает на заводе Pozzilli с 2007 года. В конце 2020 г. были поставлены 19 комплектов решеток данного типа.

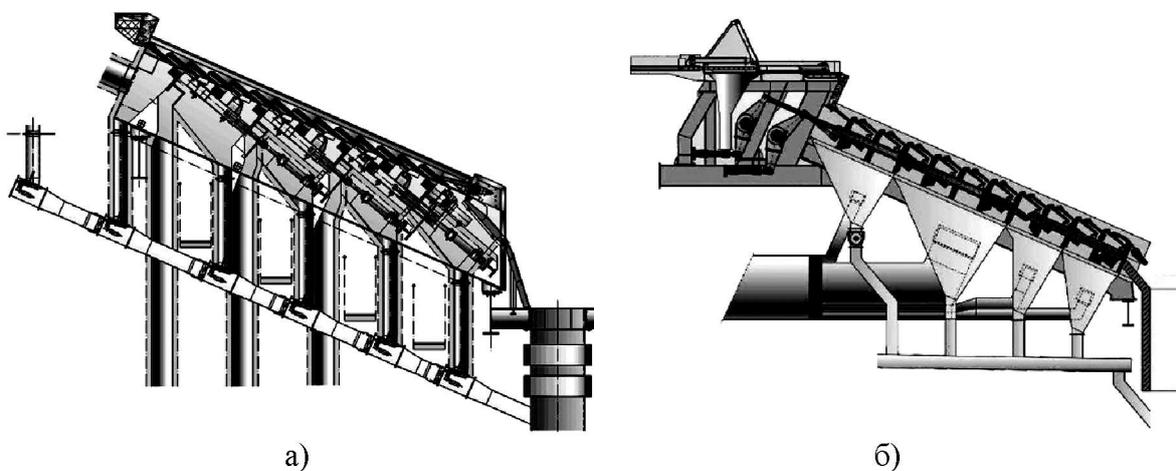


Рис. 3.5. Обратно-переталкивающие решетки фирмы Martin:
а) тип Vario; б) тип SITY2000

ОПКР SITY 2000 (рис. 3.5, б) отличается от предыдущих меньшим углом наклона (24°) и количеством независимо регулируемых секций. Всего в конце 2020 г. были поставлены более 195 комплектов решеток данного типа. Особый интерес к таким решеткам проявляет Китай – бóльшая часть изготовленных к настоящему времени ОПКР (83%) поставлено на заводы этой страны.

Модульная конструкция ОПКР фирмы Martin позволяет установить параллельно до восьми колосниковых секций, обеспечивающих ширину решетки до 20 метров.

Горизонтальная ПКР Martin (конструкция Widmer+Ernst) представляет собой встречно-переталкивающую решетку, в которых подвижные ряды колосников, перемещающиеся в противоположных направлениях, разделены рядом неподвижных колосников (рис. 3.6).

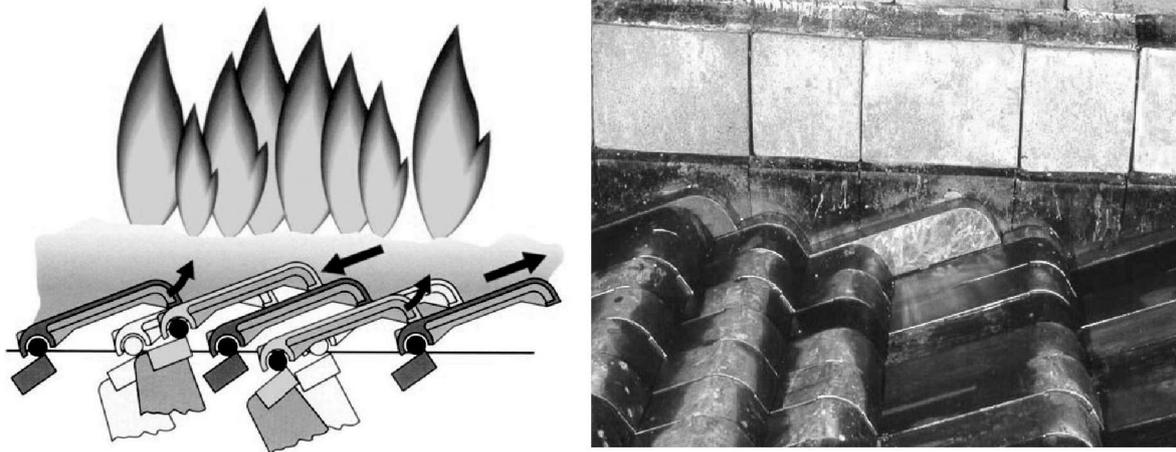


Рис. 3.6. Горизонтальная ПКР конструкции Widmer + Ernst (поставки фирмы Martin)

Такие ПКР обеспечивают хорошую шуровку и перемещение отходов даже при горизонтальном положении решетки. Обычно решетка состоит из трех последовательно расположенных по длине решетки модулей. По ширине их может быть от 1 до 3.

В период с 1980 по 2008 гг. изготовлено и запущено в эксплуатацию 114 комплектов решеток горизонтального типа.

Всего поставлено или находится в стадии изготовления 940 решеток фирмы Martin. До 1980 г. было введено в эксплуатацию 126 классических ОПКР. Динамика фактического и предполагаемого пуска в работу по годам, начиная с 1980 г., решеток различного типа показана на рис. 3.7.

Следует отметить снижение в последние годы спроса на ПКР горизонтального типа. В тоже время решетки других типов фирмы Martin постоянно востребованы (рис. 3.8).

Фирма HZI поставляет сжигательное устройство с наклонными ПКР конструкции «Von Roll» (рис. 3.3). Типовая колосниковая решетка содержит от двух до четырех модулей в длину и от одного до четырех модулей в ширину.

Следует отметить, что в зависимости от теплоты сгорания ТКО решетки изготавливают в трех модификациях: для отходов с теплотой сгорания 8–14 МДж/кг; 4–11 МДж/кг и 10–18 МДж/кг (рис. 3.9).

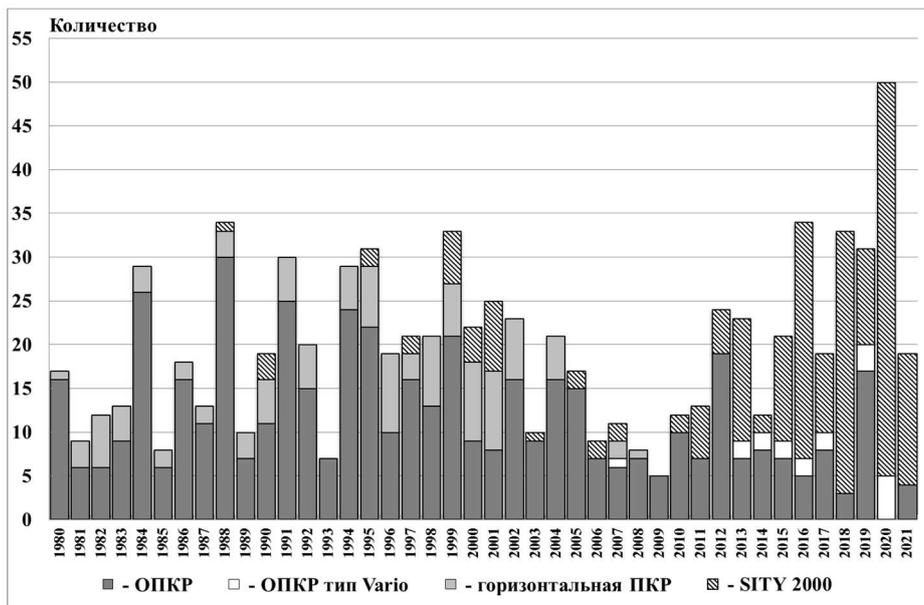


Рис. 3.7. Динамика ввода в эксплуатацию решеток фирмы Martin

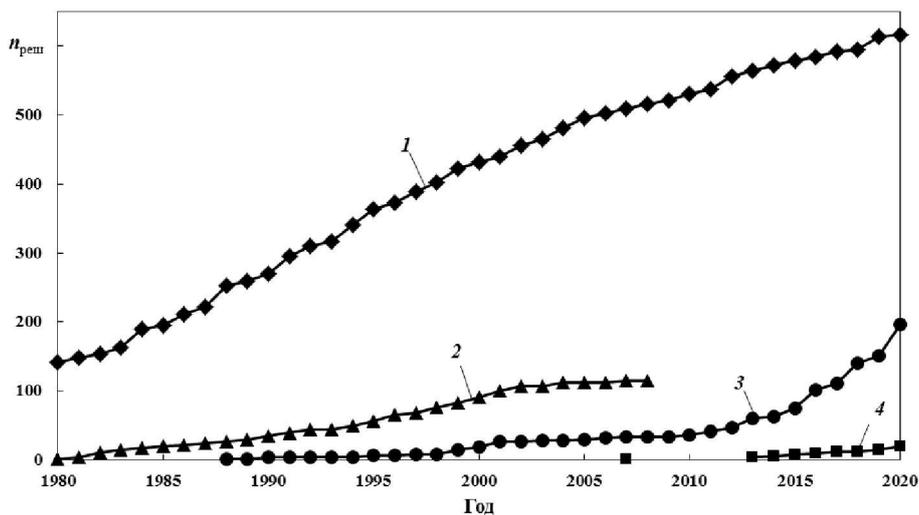


Рис. 3.8. Ввод в эксплуатацию решеток фирмы Martin:
 1 – классическая ОПКР; 2 – горизонтальная ПКР; 3 – SITY 2000;
 4 – ОПКР типа Vario®

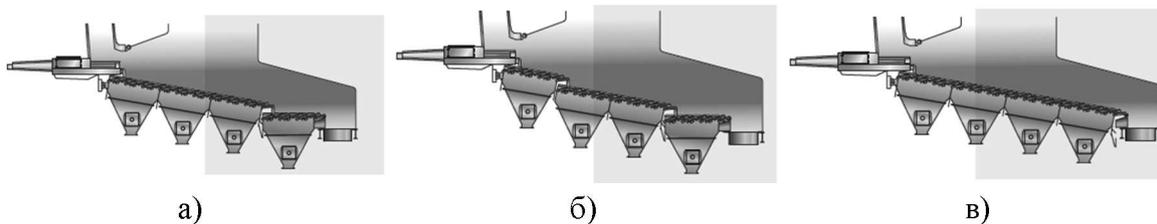


Рис. 3.9. Решетки конструкции Von Roll для сжигания ТКО:
 а) с теплотой сгорания 8–14 МДж/кг; б) с теплотой сгорания 4–11 МДж/кг;
 в) с теплотой сгорания 10–18 МДж/кг

Всего поставлено более 500 комплектов решеток конструкции Von Roll.
Фирма Babcock&Wilcox Volund A/S поставляет наклонные ПКР двух модификаций: конструкции Volund и Dyna Grate® (Braun&Sorensen). Типовая колосниковая решетка фирмы «Volund» представлена на рис. 3.10.

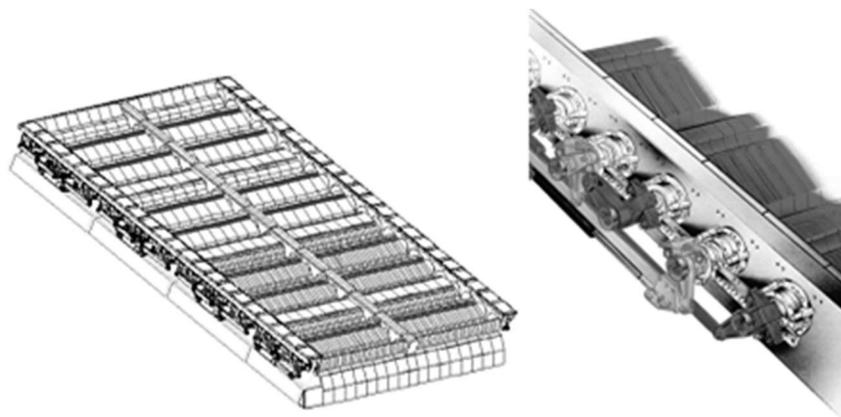


Рис. 3.10. Типовая колосниковая решетка фирмы «Volund»

Фирма Fisia Babcock Environment GmbH осуществляет поставку трех типов решеток: ПКР конструкции Noell и Steinmuller, а также валковые (конструкции Babcock, рис. 3.4).

Решетка Noell (рис. 3.11) представляет собой модернизированную решетку швейцарской фирмы К + К, после того как в 1988 г. К + К стал частью Noell GmbH. Головной образец модернизированной решетки под маркой Noell был введен в эксплуатацию на заводе Hamn (Германия) в 1992 г.

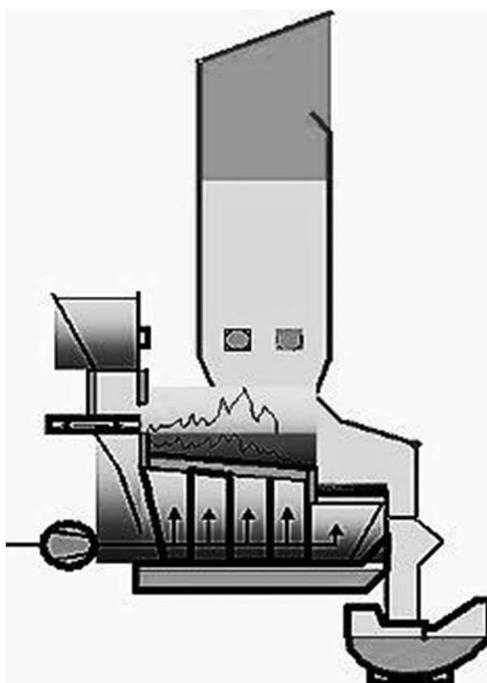


Рис. 3.11. Решетка фирмы Noell

Решетка Noell обычно выполняется одномодульной (что ограничивает ее производительность до 12 тонн в час по сжигаемым отходам), состоит из трех независимо управляемых секций (две первые по ходу движения отходов секции наклонены под углом 6° , третья расположена горизонтально).

Первичный воздух, подаваемый под решетку, может распределяться индивидуально по пяти зонам. Решетка имеет ширину от 1,8 до 2,4 м и предназначена для сжигания отходов с теплотой сгорания от 6,5 до 12 МДж/кг (при водяном охлаждении – до 20 МДж/кг).

Решетка конструкции фирмы «Steinmuller» изображена на рис. 3.12.

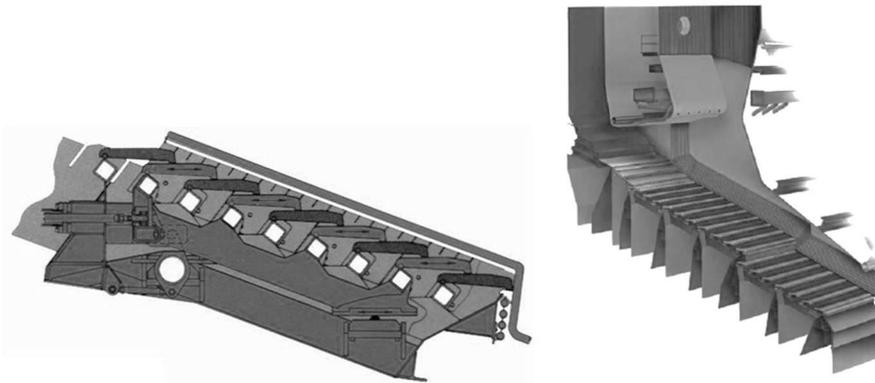


Рис. 3.12. Переталкивающая колосниковая решетка фирмы «Steinmuller»

Для сжигания ТКО Doosan Lentjes использует два типа решеток: ПКР, конструкция и принцип действия которой понятен из рис. 3.13, и валковые (рис. 3.4).

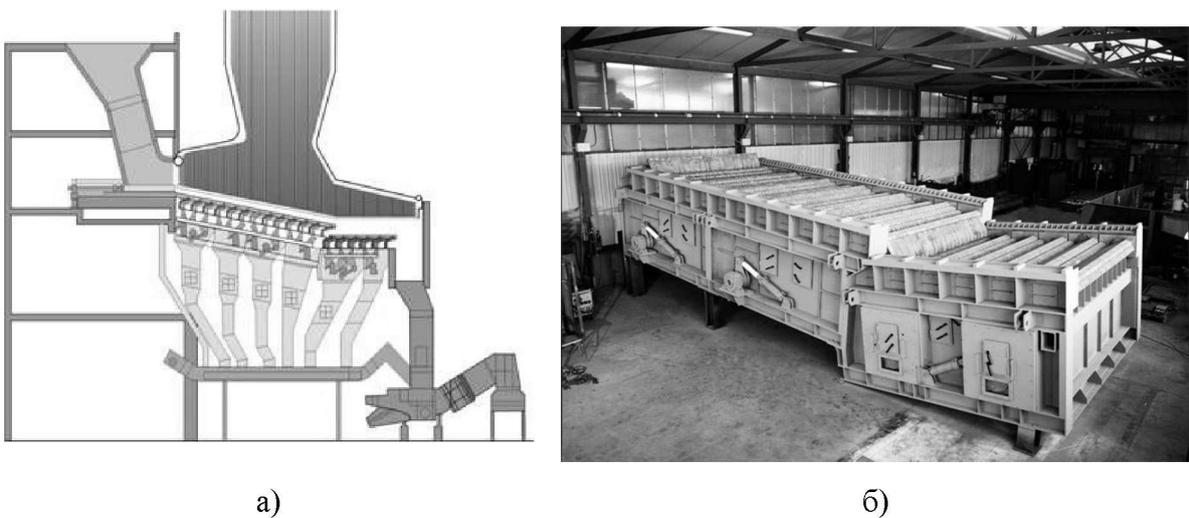


Рис. 3.13. Переталкивающая колосниковая решетка фирмы Lentjes:
а) топочное устройство; б) внешний вид переталкивающей решетки

3.1.4. Конфигурация топочного устройства, компоновка горелок и система обеспечения воздухом

По схеме организации взаимного движения ТКО и топочных газов различают три типа конфигурации топочного устройства, представленные на рис. 3.14: прямоточный, противоточный и промежуточный.

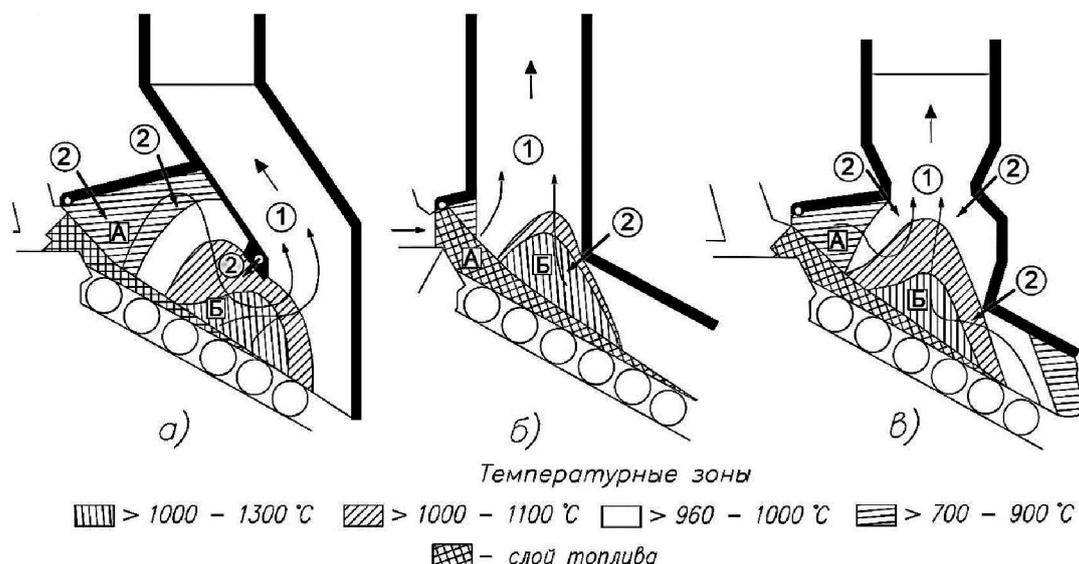


Рис. 3.14. Варианты конфигурации топочного устройства:

- а) топочное устройство прямоточного типа; б) топочное устройство противоточного типа; в) промежуточный тип топки; А – зона зажигания; Б – зона активного горения; 1 – поток газов из зоны зажигания; 2 – подвод вторичного воздуха

Для отходов с высокой теплотой сгорания, как правило, выбирается топочное устройство прямоточного типа (рис. 3.14, а), так как данная система гарантирует подачу продуктов неполного сгорания из зоны зажигания в зону активного горения, где они догорают без дополнительных технических мероприятий. Однако применение таких топочных устройств для сжигания ТКО с низкой теплотой сгорания связано с определенными трудностями их подсушки.

Топочные устройства противоточного типа (рис. 3.14, б) не вызывают таких затруднений и потому предназначаются для сжигания топлива с низкой теплотой сгорания. Однако этот тип топочных устройств имеет серьезный недостаток, который состоит в том, что часть потока топочных газов из зоны зажигания уносится прямо в газоход, не проходя самую «горячую» зону топки (зону активного горения), как это имеет место в прямоточных топочных устройствах.

Промежуточный тип топки (рис. 3.14, в) представляет собой компромиссное решение. Однако, при выборе топки промежуточного типа особое внимание следует уделять обеспечению надежной подачи потока топочных газов из зоны зажигания в зону активного горения и их перемешиванию там с другими потоками за счет создания соответствующей конфигурации свода топки и правильной организации ввода вторичного воздуха.

В целом о выборе конфигурации топочной камеры можно сказать следующее: для топлив с высокой теплотой сгорания, как правило, выбирается топочное устройство прямоточного типа. При проектировании топочных устройств на широкую гамму теплоты сгорания топлива (к таким топливам относятся ТКО, образующиеся в городах России), рекомендуется выбирать топки промежуточного типа.

Существенное влияние на процессы, протекающие в топке, оказывает конструкция стен и сводов топочной камеры. В частности, их конструкция должна, с одной стороны, препятствовать чрезмерным потерям тепла из топки, а с другой стороны, она должна обеспечивать поддержание температуры, необходимой для предотвращения отложения шлака на поверхности стен. С учетом этих требований были рассмотрены различные варианты конструктивных решений стен топочной камеры: сплошная керамическая стенка; мембранный трубный экран с ошиповкой и утеплением огнеупорной массой; стены из специального шамотного кирпича с отверстиями для пропуска испарительных труб, обеспечивающих охлаждение стен.

Расчеты показывают, что конструкция стен из фигурного шамотного кирпича с внутренним охлаждением обеспечивает повышение температуры в зоне дожигания почти на 120°C по сравнению с конструкцией стенок в виде экранов, закрытых огнеупорной массой. Теплопотери в топочной камере при такой конструкции стен снижаются почти на 60%. В большинстве зарубежных установок со слоевыми топками используется именно этот вид ограждения топочной камеры.

Влиять на процессы в топке возможно также с помощью рационального размещения горелок для сжигания дополнительного топлива (как правило, природного газа). Компоновка горелочных устройств определяется, прежде всего, требованиями, которые предписывают использовать горелки в топке при падении температуры ниже 850°C . Кроме того, условия эксплуатации установок по сжиганию ТКО требуют создания температуры в топке с помощью горелок до 800°C перед загрузкой первой партии ТКО при розжиге, а также поддержания этой температуры до полного сгорания последней партии отходов в случае останова.

В современных сжигательных агрегатах горелочные устройства размещают непосредственно в топке. В результате реализации такого решения время пребывания топочных газов в пределах зоны с температурой выше 900°C может быть увеличено до 2,5 сек. Преимущество такого расположения горелок проявляется не только в улучшении дожигания топочных газов, но и в снижении доли недожога в шлаке.

На эффективность использования тепла продуктов сгорания дополнительного топлива также влияет конструкция горелок и места их размещения на стенах топки.

В топках противоточного типа используют длиннофакельные горелки и размещают их на задней стене камеры горения таким образом, чтобы создаваемая в конце колосниковой решетки высокая температура обеспечивала полное дожигание отходов, а продукты сгорания природного газа, проходящие противотоком над слоем отходов, способствовали их надежному воспламенению и горению. Однако, в этом случае, последние по ходу ТКО колосники работают в тяжелых температурных условиях.

В топках прямоточного и промежуточного типа наиболее распространенным является встречная компоновка вихревых горелок на боковых стенках топочной камеры непосредственно под пережимом. При такой компоновке горелок обеспечивается быстрое и надежное воспламенение отходов по всей ширине слоя на решетке, а также оптимальное положение зоны высоких температур в надслоевом пространстве. Это позволяет наилучшим образом организовать как сушку, зажигание и горение ТКО в слое, так и дожигание газообразных продуктов неполного горения, и снижение неравномерности поля температур дымовых газов перед поверхностями нагрева котла-утилизатора.

На процессы, протекающие в топке, влияет и организация подачи первичного и вторичного воздуха. Под первичным воздухом понимают необходимый для горения воздух, который подают в слой топлива (под решетку). Соответственно, под вторичным воздухом – воздух, подаваемый в надслоевое пространство.

Первичный воздух распределяется по секциям нижнего дутья с учетом теплоты сгорания ТКО и условий его сжигания. Для ускорения подсушки и зажигания отходов, а также для обеспечения температурного уровня в топке, необходимого для самоподдерживающегося (автотермического) горения отходов и разложения органических загрязняющих веществ, первичный воздух подогревается. Его подогрев до 120°C вызывает повышение температуры в топке на 42°C, а до 280°C – на 67°C. Температура первичного воздуха подаваемого в зону сушки топлива, может

отличаться от температуры первичного воздуха, подаваемого в другие зоны. Это связано с необходимостью избегать условий, при которых в зоне сушки и подготовки возможен низкотемпературный пиролиз с образованием негорючих продуктов (пирогенетической влаги).

Подогрев вторичного воздуха в меньшей степени влияет на температуру в топке, так как его доля меньше, чем первичного. Расход вторичного воздуха можно регулировать с помощью автоматики по содержанию СО в камере дожигания. Вторичный воздух в любом режиме работы должен подаваться в камеру дожигания с высокой скоростью таким образом, чтобы обеспечить его активное перемешивание с топочными газами. В большинстве современных слоевых топок для сжигания ТКО это реализуется с помощью подачи вторичного воздуха в район пережима в виде системы струй в сносящем потоке дымовых газов через сопла, которые ориентированы под углом вниз, навстречу потоку.

**3.1.5. Технические параметры,
обеспечивающие оптимальные условия работы слоевых топок
с механическими решетками**

Периоды подготовки (прогрева и сушки), воспламенения, горения и дожигания отходов на колосниковой решетке в значительной степени зависят от производительности установки и свойств отходов. Эти стадии, происходящие на решетке, определяют удельную нагрузку зеркала горения колосниковой решетки q_F^B , которую с достаточной степенью точности можно оценить с помощью следующей формулы:

$$q_F^B = K_L \cdot \lg B, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (3.1)$$

где B – количество сжигаемых отходов, кг/ч; K_L – коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами отходов, в первую очередь, их теплотой сгорания – Q_i' . Его значения в зависимости от теплоты сгорания отходов приведены ниже.

Q_i' , кДж/кг	K_L
3 350–4 190.....	69–79
4 190–5 030.....	79–85
5 030–5 870.....	85–95
5 870–8 380.....	95
8 380–9 220.....	93–95
9 220–10 900.....	84–93
10 900–12 570.....	68–84
12 570–14 250.....	52–68

Коэффициент пропорциональности имеет максимальное значение для отходов с теплотой сгорания 5 800–8 500 кДж/кг. Именно в отходах с такими значениями теплоты сгорания содержится наибольшее количество легко разлагаемых летучих продуктов, а также составляющих с высоким содержанием кислорода. При сжигании отходов $Q_i^r > 8 500$ кДж/кг в них увеличивается содержание углеводородов, которые требуют больше энергии для разрушения межмолекулярных связей, и, следовательно, бóльшего времени. При сжигании отходов с $Q_i^r < 5 800$ кДж/кг процесс замедляется, что объясняется наличием большого количества влаги, испарение которой также требует дополнительных затрат энергии и времени. Приведенные выше данные коэффициента пропорциональности и теплоты сгорания аппроксимируются следующей зависимостью:

$$K_L = 22,85 + 0,0179 \cdot Q_i^r - 0,000001129 \cdot (Q_i^r)^2. \quad (3.2)$$

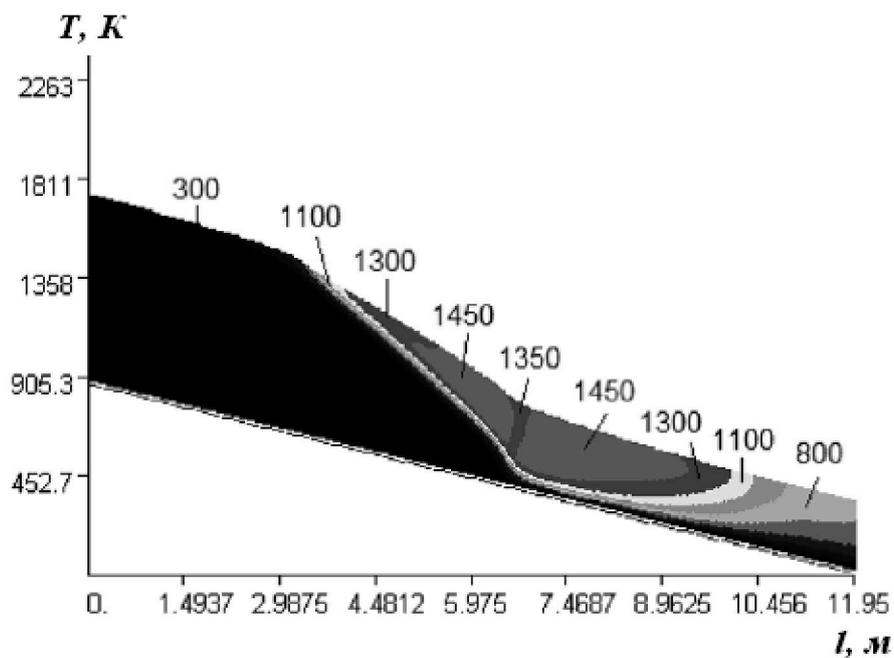
Зная удельную производительность по сжигаемым отходам (q_F^B), можно определить расчетную площадь колосниковой решетки:

$$F = B/q_F^B. \quad (3.3)$$

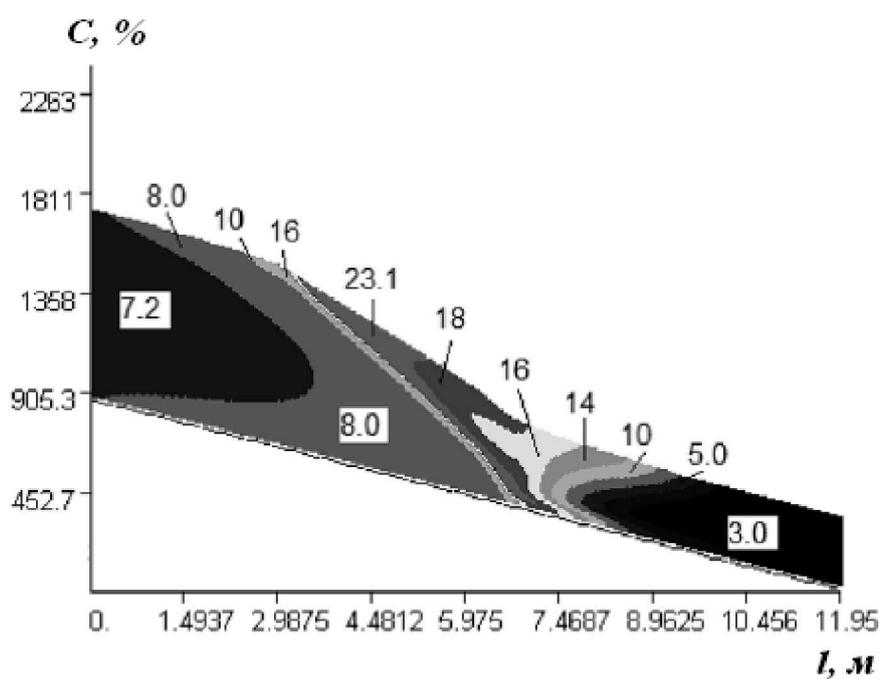
Геометрия решетки, оптимальная высота слоя отходов, эксплуатационные параметры определяются на основании расчета (численного моделирования) топочных процессов, протекающих в слое и надслоевом пространстве. Например, такие расчеты приводятся в [11] для сжигания ТКО на валковой решетке и в [12] для переталкивающей решетки. Обобщая результаты этих расчетов, основу которых составляют известные уравнения, можно заключить, что оптимальной является подача воздуха в слой (под решетку) в соотношении 1,1 к стехиометрическому и в целом в топку – 1,8. В этом случае можно прогнозировать при сжигании ТКО идеальную картину горения, представленную на рис. 3.15.

При организации топочного процесса желательно, чтобы начало зоны интенсивного выгорания коксового остатка приходилось примерно на середину решетки. Допускается смещение этой зоны влево или вправо, если соответственно процесс сушки интенсифицируется, например, за счет подогрева воздуха до более высоких температур, или затягивается при сжигании более влажных отходов. Понятно, что в последнем случае длина решетки должна быть увеличена. Процесс выгорания коксового остатка должен в основном завершаться при $l/l_p = 0,8–0,85$, где l_p – общая длина решетки. В целом же расположение зон по длине решетки выглядит следующим образом:

- сушка – от 0 до $(0,2–0,25) l_p$;
- выход и горение основной доли летучих – $(0,25–0,3) l_p$;
- выгорание бóльшей части коксового остатка – $(0,5–0,6) l_p$.



a)



б)

Рис. 3.15. Распределение температуры в слое отходов (а) и динамика изменения относительного содержания связанного углерода (б) по длине переталкивающей колосниковой решетки производительностью 23,5 т/ч при сжигании ТКО (ширина решетки – 6,25 м) [12]

В этом случае температура слоя может достигать в зоне интенсивного горения 1 200°С, что вполне достаточно для соблюдения экологических требований [13].

Часто возникает необходимость в существующей топке сжигать отходы с теплотой сгорания, отличающейся от проектной. В этом случае определяют величину теплового напряжения зеркала горения решетки (q_F) и сравнивают с допустимой. Тепловое напряжение зеркала горения решетки q_F рассчитывают по формуле:

$$q_F = B \cdot Q_i^r / (3600 \cdot F), \text{ кВт/м}^2, \quad (3.4)$$

где B – количество сжигаемых отходов, кг/ч; F – фактическая площадь колосниковой решетки, м²; Q_i^r – удельная теплота сгорания отходов кДж/кг.

По данным [14] эта величина не должна превышать 900–1 200 кВт/м². Однако на практике фирмы-поставщики несколько снижают предельное значение теплового напряжения зеркала горения.

Поскольку процесс горения в слоевых топках происходит как в слое ТКО на колосниковой решетке, так и в объеме топочной камеры, определяют также тепловое напряжение топочной камеры (q_V):

$$q_V = Q_i^r \cdot B / (3600 \cdot V), \text{ кВт/м}^3, \quad (3.5)$$

где V – объем топочной камеры, м³.

С уменьшением площади колосниковой решетки и увеличением производительности установки теплонапряжение топочной камеры возрастает. Считается, что для ТКО значение q_V не должно превышать 420 кВт/м³ ($1\,500 \cdot 10^3$ кДж/(м³ · ч)). В [14] указывается, что эта величина должна находиться в диапазоне 290–470 кВт/м³.

3.2. Сжигание отходов в кипящем слое

Одним из способов термической переработки отходов, получившим распространение в ряде стран, является их сжиганием в топках с кипящим слоем (ТКС).

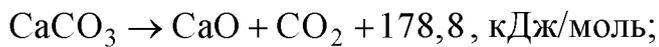
3.2.1. Основные характеристики кипящего слоя и процессы, протекающие в топках с кипящим слоем

Отличительная особенность процесса сжигания отходов в кипящем слое заключается в создании эффекта псевдооживления или «кипения» отходов и инертного материала за счет восходящего газового потока. В качестве инертного материала обычно используют калиброванный крем-

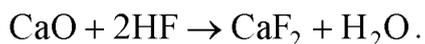
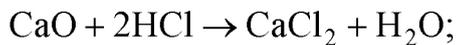
нистый песок, который, обладая большой теплоемкостью, позволяет стабилизировать температуру процесса независимо от значительных изменений качества и количества подаваемых отходов. Интенсивное кипение слоя вызывает энергичное перемешивание отходов, окислителя и высокотемпературных продуктов сгорания, приводящее к интенсивному зажиганию, без применения движущихся деталей, что является одним из преимуществ этих топок.

В ТКС имеется возможность связывать некоторые вредные вещества, образующиеся при сжигании.

При добавлении в топку с кипящим слоем известняка или доломита происходит связывание оксида серы с получением гипса с последующим его выносом. В слое будут протекать следующие реакции:



Добавка известняка и доломита позволяет также частично снижать выбросы других вредных эмиссий, образующихся при сжигании ТКО. Так, например, галогены, главным образом соединения фтора и хлора, подвергаются пирогидролитическому разложению и превращаются во фтористый и хлористый водород. Образовавшиеся частицы CaO реагируют в кипящем слое с фтористым и хлористым водородом, в результате чего образуются вторичные фториды и хлориды кальция:



Следует правда отметить, что эффективность процесса связывания хлористого и фтористого водорода в топках с кипящим слоем заметно ниже, чем оксида серы.

Низкая температура сжигания отходов в кипящем слое препятствует возникновению термических оксидов азота.

Характер кипящего слоя определяется скоростью воздуха, продуваемого через слой. При повышении этой скорости наступает момент, когда аэродинамическая сила, действующая на каждую, частицу топлива, преодолевают силы трения частиц друг о друга и гравитационные силы. В результате частицы будут находиться в динамическом равновесии, оставаясь во взвешенном состоянии (слой как бы «кипит»). Минимальная скорость, при которой начинается псевдооживление, называют первой критической скоростью $W_1^{\text{кр}}$.

Второй критической скоростью $W_2^{кр}$ является скорость, при которой аэродинамическая сила становится равной силе тяжести частиц топлива и начинается их интенсивный вынос из слоя.

Реальные ТКС работают со скоростями в диапазоне от $W_1^{кр}$ до $W_2^{кр}$ причем различают топки с обычным или стационарным (пузырьковым) кипящим слоем (когда скорость в слое близка $W_1^{кр}$) и топка с циркулирующим кипящим слоем (когда скорость в слое близка $W_2^{кр}$). В последнем случае из слоя выносятся значительная часть недогоревшего топлива, которая затем улавливается в «горячих» циклонах и возвращается для дожигания в слой.

Отходы, имеющие широкий диапазон по фракционному составу, сжигают в вихревом кипящем слое, где увеличение времени пребывания ТКО в слое обеспечивается за счет принудительного вращения слоя, которое достигается наклоном сопловой решетки, ступенчатой подачей воздуха вдоль решетки и геометрией камеры.

3.2.2. Топки для сжигания отходов в пузырьковом кипящем слое

Пузырьковый кипящий слой характеризуется низкими скоростями (до 2,5 м/с) воздуха, подающегося на сжигание и невысокими теплотонапряжениями (около 2 МВт/м²).

В топках с пузырьковым кипящим слоем сжигают в основном специально подготовленные твердые коммунальные отходы (RDF), а также осадок сточных вод, древесные отходы (кору, опилки), бумагу. Анализ работы промышленных установок, сжигающих неподготовленные ТКО в пузырьковом кипящем слое, показал, что основные проблемы связаны не с самой технологией сжигания, а с подачей топлива в топку и удалением из нее ЗШО.

Наибольший опыт в изготовлении оборудования для сжигания отходов в пузырьковом кипящем слое имеет финская фирма «Metso Power» (с конца 2013 г. «Valmet»), разработавшая оригинальную технологию HVBEX ACZTM. Первая топка с пузырьковым кипящим слоем для сжигания отходов была пущена этой фирмой в эксплуатацию в г. Lidköping (Швеция) в 1994 г. К настоящему времени изготовлено около 20 топок с пузырьковым кипящим слоем для сжигания ТКО, работающих по технологии HVBEX ACZTM. В качестве примера на рис. 3.16 изображен котел тепловой мощностью 20 МВт, оборудованной такой топкой. Котел работает с конца 2013 г. на электростанции, принадлежащей компании Västervik Miljö&Energi, и генерирует пар с параметрами 6 МПа и 410°C.

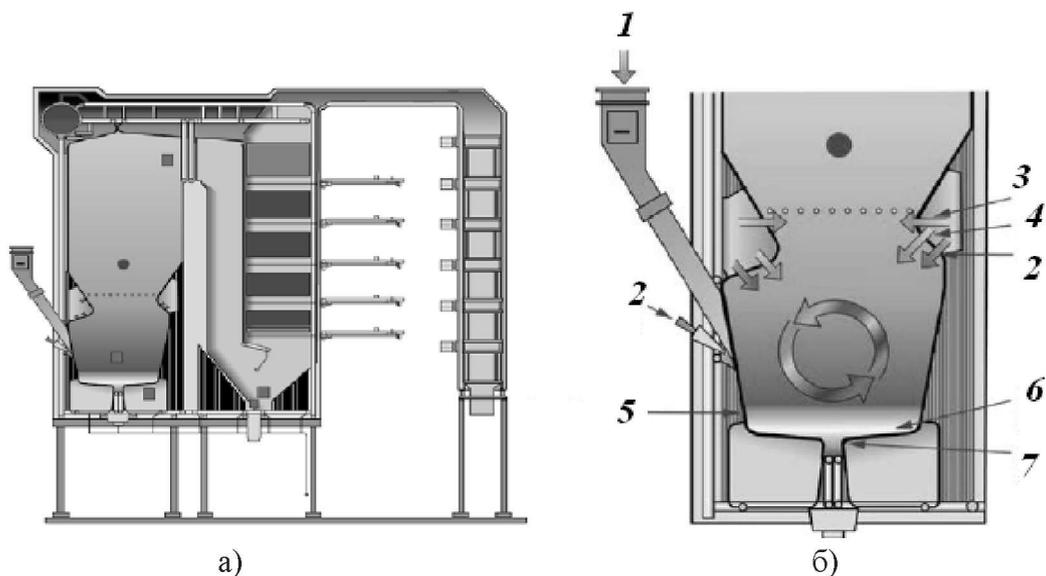


Рис. 3.16. Котел для сжигания отходов в пузырьковом кипящем слое по технологии HUBEX ACZTM:

а) профиль котла; б) схема топки; 1 – подача отходов; 2 – рециркуляция дымовых газов; 3 – третичный воздух; 4 – вторичный воздух; 5 – зона выгрузки донной золы (шлака); 6 – сопловая решетка; 7 – течка донной золы

Топки с пузырьковым кипящим слоем для сжигания отходов нашли применение в Италии, Франции, Швеции, Германии и Великобритании. Зачастую в этих топках наряду с ТКО сжигают осадок сточных вод, древесные отходы (кору, опилки).

Однако широкого распространения такие топки для сжигания ТКО не получили. Более того, в последние годы наблюдается тенденция по замене топок с пузырьковым кипящим слоем, требующих тщательную подготовку ТКО, на обычное слоевое сжигание на колосниковой решетке.

В качестве примера можно привести завод Eksjö (Швеция), где с 1979 г. эксплуатировались два котла с ТКС общей мощностью 17,5 МВт. В 2005 г. закончилась реконструкция этого завода, в результате которой котлы с ТКС были заменены на котлы с решеткой «Volund» производительностью 7,75 т/ч (18 МВт).

3.2.3. Котлы для сжигания ТКО в циркулирующем кипящем слое

С развитием технологии сжигания различных видов топлива в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) накоплен значительный опыт и по сжиганию ТКО в котлах с ЦКС. Скорость воздуха в установках с ЦКС достигает 6 м/с, а теплонапряжение поверхности слоя – 7 МВт/м².

Следует отметить, что для сжигания ТКО в котлах с ЦКС требуется их предварительная подготовка (измельчение, удаление металла и крупных инертных материалов, перемешивание), и качество полученного RDF очень сильно влияет на надежность работы всей установки, а зачастую и определяет ее. Но при этом энергоустановки с котлами с ЦКС имеют достаточно высокую для такого топлива, как ТКО, энергоэффективность: КПД составляет около 28%.

Наибольшее распространение сжигание ТКО в ЦКС получило в Китае. Уже в 2012 г. число предприятий с котлами ЦКС составляло 47, а их суммарная производительность по сжигаемым в таких котлах отходам достигла 40 170 т в сутки [10]. В 2011 г. запущен в эксплуатацию самый крупный в то время котел с ЦКС, сжигающий 800 т ТКО в сутки генерирующий пар с параметрами 5,3 МПа, 485°C.

На рисунке 3.17 показаны его схема, а ниже приведены основные технические показатели.

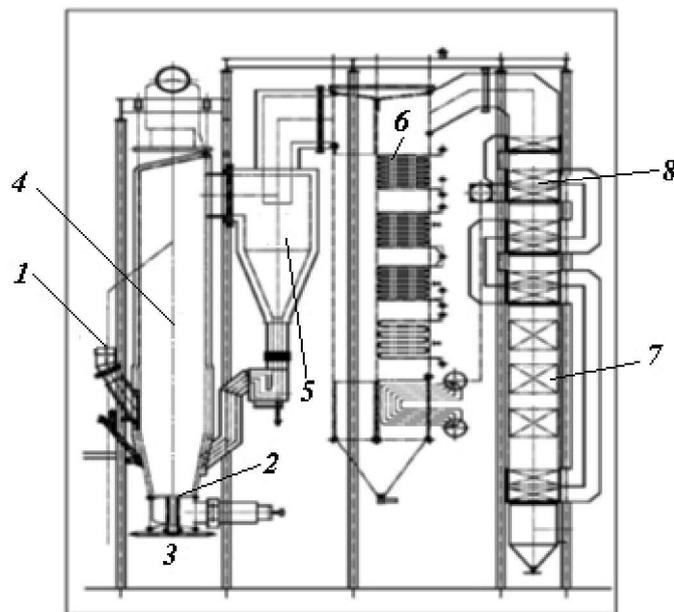


Рис. 3.17. Схема котла с ЦКС для сжигания 800 т ТКО в сутки в городе Цыси, провинция Чжэцзян, Китай:

1 – питатель ТКО; 2 – сопловая решетка; 3 – выгрузка шлака; 4 – топочное устройство; 5 – циклон; 6 – пароперегреватель; 7 – экономайзер; 8 – воздухоподогреватель

Основные технические показатели котла с ЦКС для сжигания 800 т ТКО в сутки в городе Цыси приведены ниже.

Количество сжигаемых отходов, кг/ч (т/сутки)	33 300 (800)
Средняя теплота сгорания ТКО, кДж/кг (ккал/кг)	3 970 (950)
Паропроизводительность, т/ч	34

Давление пара на выходе из пароперегревателя, МПа	5,3
Температура пара на выходе из пароперегревателя, °С	485
Температура питательной воды, °С	150
Температура уходящих газов, °С	165
КПД котла, %	77,1
Расход шлака, кг/ч (%)	5 330 (16)
Расход летучей золы, кг/ч (%)	3 860 (11,6)
Концентрация в уходящих газах:	
– твердых частиц, мг/нм ³	11,6
– SO ₂ , мг/нм ³	52,7
– NO _x , мг/нм ³	144
– ПХДД/ПХДФ, нг/ нм ³	0,097

В Европе котлы для сжигания ТКО в ЦКС часто устанавливают на обычных ТЭС. В качестве примера можно привести ТЭС Handelo в г. Норрчепинге (Швеция), на которой в 2003 г. был запущен в эксплуатацию котел с ЦКС тепловой мощностью 75 МВт, позволяющий сжигать около 20 т/ч ТКО (200 тыс. т/год) и генерировать пар с параметрами: 27 кг/с, 6,5 МПа, 470°С (рис. 3.18). Котел изготовила финская фирма Metso Power (Valmet).

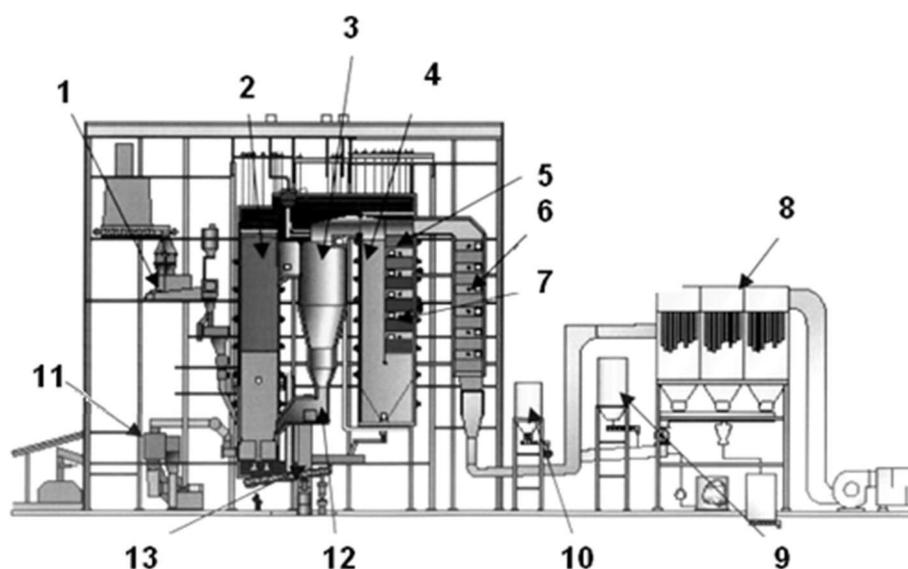


Рис. 3.18. Схема термической переработки отходов в циркулирующем кипящем слое на ТЭС Handelo:

- 1 – питатель; 2 – топка с ЦКС; 3 – циклоны возврата золы; 4 – радиационный опускной газоход; 5 – испаритель; 6 – экономайзер; 7 – пароперегреватель; 8 – газоочистная система; 9–11 – силосы реагентов; 12 – зольный поверхностный теплообменник; 13 – классификатор донной золы

Другой котел с ЦКС этой фирмы тепловой мощностью 126 МВт с 2010 г. работает в составе энергоблока электрической мощностью 43 МВт на ТЭС Langerbrugge (г. Генте, Бельгия). Основные технические показатели котла Langerbrugge для сжигания отходов в ЦКС приведены ниже.

Тепловая мощность, МВт.....	125
Теплота сгорания отходов, МДж/кг	10–26
Паропроизводительность, т/ч	162
Давление перегретого пара, МПа.....	6,0
Температура перегретого пара, °С.....	475
КПД котла, %.....	91,2
Соотношение шлак/ летучая зола, % масс.	58/42
Содержание углерода в летучей золе, % масс.	0,2
Концентрация в уходящих газах после котла (до очистки):	
– NO _x , мг/нм ³	40–100
– СО, мг/нм ³	менее 10
– НСl, мг/нм ³	500–700

В 2014 г. в г. Västerås (Швеция) введен в строй самый большой в мире котел с ЦКС для сжигания отходов, изготовленной фирмой Valmet для компании Mälarenergi. Тепловая мощность котла составляет 155 МВт. Котел входит в состав энергоблока электрической мощностью 50 МВт и имеет параметры пара: 7,5 МПа, 470°С. Всего фирмой Valmet изготовлено семь котлов для сжигания подготовленных ТКО в ЦКС.

Еще одной компанией, изготавливающей котлы с ЦКС для сжигания ТКО, является фирма Foster Wheeler, которая поставила котлы на ТЭС «Lomellina» (Италия), расположенную в 30 км от Милана (Италия). Котлы генерируют пар с параметрами 6,0 МПа, 440°С. На первой очереди этого предприятия, запущенной в коммерческую эксплуатацию в 2000 г., ежегодно перерабатывается 200 тыс. т ТКО и отпускается в сеть примерно 100–115 ГВт·ч электроэнергии в год. Вторая очередь ТЭС позволяет сжигать еще 180 тыс. т отходов ежегодно. После ввода ее в работу в 2007 г. установленная электрическая мощность ТЭС «Lomellina» была увеличена с 17 до 25,8 МВт.

3.2.4. Установки для переработки ТКО в топках с вихревым кипящим слоем

Технология сжигания отходов в вихревом кипящем слое (ВКС) (технологии с кипящим слоем ROWITEC®) была разработана японской фирмой Ebara Corporation и в настоящее время широко применяется в

Японии (более чем на 80 заводах). Суть этой технологии заключается в том, что в нижней части топки, где происходит основное горение отходов, за счет соответствующей подачи воздуха, формы решетки и конструкции топки формируется так называемый вихревой кипящий слой.

Различают установки, работающие по принципу одновихревого и двухвихревого кипящего слоя. Сжигание топлива в двухвихревом кипящем слое осуществляется следующим образом. В нижней части топочно-го устройства, в которой происходит основное горение отходов, формируются парные вихревые зоны – вихревой кипящий слой. Кипящий слой состоит как бы из двух зон песка с сечением эллиптической формы, расположенных зеркально по отношению друг к другу и движущихся навстречу друг другу (рис. 3.19).

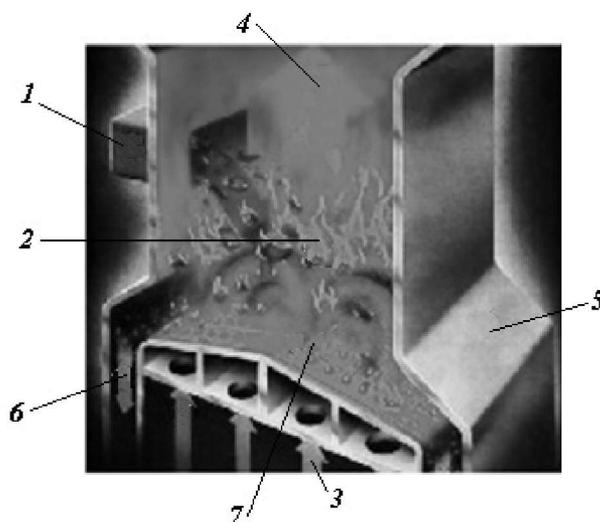


Рис. 3.19. Принцип действия вихревого кипящего слоя:

1 – загрузка отходов, 2 – вихревой кипящий слой, 3 – подача воздуха для создания кипящего слоя, 4 – выход дымовых газов, 5 – отражательная плита, 6 – выгрузка золы кипящего слоя (шлака), 7 – наклонная сопловая решетка

Отражательные плиты ограничивают расширение кипящего слоя в вертикальном направлении и поддерживают вращение слоя по направлению к середине камеры. Такое движение обеспечивает хорошее поперечное перемешивание материала слоя и создает необходимые условия для равномерного и стабильного распределения температур и эффективного сжигания: длительное пребывание частиц ТКО и полное выгорание углерода в отходах при низких ($550\text{--}700^\circ\text{C}$) температурах и избытке воздуха.

Избыток воздуха в слое поддерживается около единицы, а дожигание неполных продуктов сгорания происходит в надслоевом пространстве, куда подают вторичный воздух. В результате такого двухступенчатого сжигания уменьшается образование оксидов азота, концентрация которых в дымовых газах можно гарантированно снизить до 200 мг/м³ и ниже.

Подготовка отходов к сжиганию не столь сложна как для ЦКС: перед сжиганием из ТКО удаляют металл, а сами отходы измельчают до размеров частиц менее 200 мм.

В Европе первая установка с ВКС, производительностью 8,5 т/ч, была построена в 1997 г. в Берлине. В зависимости от теплоты сгорания установка генерировала пар с расходом 17–23 т/ч (475°C; 7,5 МПа), который поступал через имеющуюся паровую сеть на соседнюю электростанцию. В настоящее время в Европе построены и пущены в эксплуатацию еще несколько заводов, на которых применена технология ROWITEC, в том числе и в Москве на спецзаводе (СЗ) №4 (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Заводы, сжигающие коммунальные отходы в топках с вихревым кипящим слоем, на территории Европы

Город, страна	Количество установок, шт.	Производительность одной ТЛ, т/ч	Производительность завода, т/г	Средняя теплота сгорания, МДж/кг	Параметры пара, °С/МПа	Установленная электрическая мощность, МВт	Ввод в эксплуатацию, год
Макомер I + II, Италия	2	3	45,0	10,47	370/4,0	2,5	1994/1998
Мадрид, Испания	3	12,2	300,0	11,5	425/4,7	30,0	1997
Жиенен, Франция	2	5	78,0	10,5	350/3,6	5,2	2000
Мюлхаус, Франция	2	11,5	172,0	8,2	360/3,8	11,5	2001
Москва, Россия	3	13,5	250,0	6,25	310/1,6	12,0	2003
Вена, Австрия	1	12,7	96,0	11,0	354/5,4	Теплофикация района	2003
Антверпен, Бельгия	3	19,4	465,0	8,3	400/6,1	33,0	2006
Эллингтон, Великобритания	3	21,4	500,0	9,07	425/6,5	43,0	2006

Схема энергетической утилизации ТКО на московском заводе представлена на рис. 3.20. Производительность завода составляет 250 тыс. тонн ТКО в год. В состав завода входят три технологические линии с топкой для сжигания отходов в вихревом кипящем слое, котлом-утилизатором и современным газоочистным оборудованием. Проектная производительность каждой ТЛ – 13,5 т/час при теплоте сгорания ТКО 6,5 МДж/кг.

Генерируемый в котле-утилизаторе пар направляется в котлотурбинный цех, где кроме двух турбин типа П-6-1,6/0,5 и вспомогательного оборудования к ним, установлены два энергетических котла ДЕ-25-15-185ГМ, которые используются при пуске завода из «холодного» состояния, а также для покрытия дефицита пара. Вырабатываемая турбогенераторами электроэнергия покрывает собственные нужды завода, а ее избыток отпускается во внешние сети.

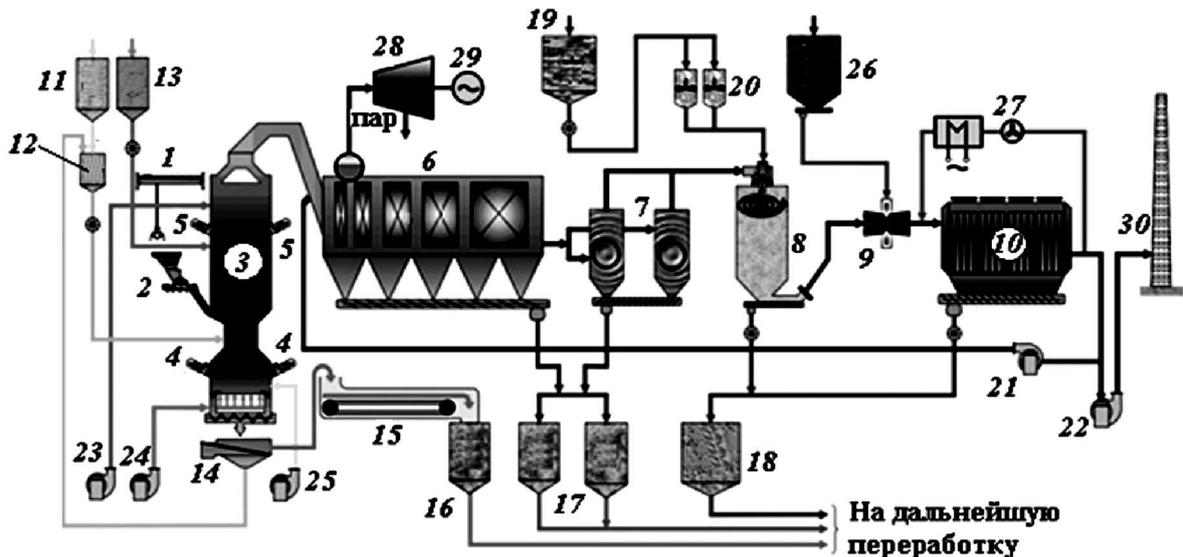


Рис. 3.20. Схема энергетической утилизации ТКО на московском СЗ №4:

- 1 – мостовой грейферный кран; 2 – загрузочная воронка с питателем;
- 3 – топка с кипящим слоем; 4, 5 – газовые горелки; 6 – котел-утилизатор;
- 7 – циклон; 8 – распылительный абсорбер; 9 – узел подачи реагентов; 10 – рукавный фильтр; 11 – бункер песка; 12 – перепускной бункер; 13 – бункер известняка (подача известняка в слой не используется); 14 – вибросито; 15 – шлаковый транспортер;
- 16 – бункер шлака; 17 – бункер золы уноса; 18 – бункер продуктов газоочистки;
- 20 – резервуар для приготовления известкового молока; 21 – дымосос рециркуляции дымовых газов (не используется); 22 – дымосос; 23 – вентилятор вторичного воздуха; 24 – вентилятор первичного воздуха; 25 – вентилятор для удаления золы; 26 – бункер смеси активированного угля и извести; 27 – система подогрева рукавного фильтра;
- 28 – паровая турбина; 29 – генератор; 30 – дымовая труба

Подводя итог обзору технологий сжигания ТКО в ТКС, можно заключить, что по энергоэффективности эти технологии проигрывают сжиганию в слоевых топках с механической колосниковой решеткой из-за высоких затрат на собственные нужды, которые, в свою очередь, связаны с необходимостью подготовки отходов к сжиганию.

3.3. Термическая переработка отходов с использованием процессов газификации и пиролиза

3.3.1. Общие сведения о процессах

Пиролиз

Как уже отмечалось в разд. 2.3.2, под пиролизом ТКО понимается термическая деструкция (разложение) их составляющих в отсутствие окислителей или других добавок с выходом газообразных продуктов, жидкой фазы и образованием коксового остатка.

При пиролизе отходов под воздействием температуры протекают следующие связанные между собой процессы: сушка, сухая перегонка (карбонизация), взаимодействие образовавшихся газообразных продуктов. Соответственно, в процессе пиролиза можно выделить следующие стадии:

- сушка;
- карбонизация;
- образование пирогаза.

При температуре до 200°C происходит выделение влаги. Процесс карбонизации протекает при температуре от 200°C до 500°C. В зависимости от влажности и состава ТКО количество твердых остатков составляет приблизительно 0,2–0,4 кг/кг исходных отходов. На стадии образования газа, которая имеет место при температуре выше 500°C, продукты процесса карбонизации (газ, жидкие органические соединения, углерод) расщепляются. В результате образуются устойчивые газы, такие как H_2 , CO , CO_2 , CH_4 .

Соотношение количеств получаемых газообразных и жидких продуктов, а также их состав зависят от условий пиролиза. Наибольшее количество жидких продуктов разложения, таких как смолы, масла и дегти, получаются при температуре ниже 550°C. С увеличением температуры пиролиза возрастает количество пирогаза. В температурном диапазоне выше 800°C образуются почти одни газообразные продукты. Дальнейшее повышение температуры приводит к некоторому снижению теплоты

сгорания образующегося газа. Дело в том, что при одинаковом составе отходов по мере возрастания температуры процесса уменьшается доля метана (при увеличении температуры от 800 до 1 000°С – с 9,5 до 3,5 об.%, соответственно). Доля СО возрастает с 13 об.%, при 800°С до 29 об.%, при 1 000°С, а СО₂ уменьшается с 23 об.%, соответственно.

В общем случае теплота сгорания пиролизного газа ТКО находится в диапазоне 4–16 МДж/нм³, в зависимости от влажности отходов и температуры процесса.

При пиролизе стараются избегать области температур в интервале 1 050–1 400°С, поскольку при этом начинается размягчение шлаков, что может привести к неполадкам в системе шлакоудаления.

Таким образом, температура процесса является решающим фактором, определяющим состав и теплоту сгорания пиролизного газа. В соответствии с температурным уровнем процесса пиролизные установки подразделяются на низкотемпературные (450–500°С), характеризующиеся минимальным выходом газа, максимальным количеством смол, масел и твердых остатков; среднетемпературные (до 800°С), при которых увеличивается выход газа, а количество смол и масел уменьшается; высокотемпературные (свыше 800°С) отличающиеся максимальным выходом газов и минимальным – смолообразных продуктов и твердых остатков.

Установки пиролиза можно также классифицировать по типу используемого реактора на следующие:

- установки пиролиза во вращающемся барабане;
- установки пиролиза в кипящем слое;
- шахтные печи (швельшахты).

Как правило, в установках с вращающимся барабаном осуществляется низко- и среднетемпературный пиролиз. Установки с кипящим слоем используются для среднетемпературного пиролиза, а в шахтных печах реализуется высокотемпературный пиролиз.

Газификация

В процессе газификации ТКО углеродосодержащие компоненты отходов при добавлении газифицирующего агента превращаются в газообразные горючие соединения (синтез-газ), смолы и ЗШО. Принципиальное отличие процесса газификации от пиролиза заключается в том, что горючий газ образуется в результате окислительных и восстановительных реакций между газифицирующим агентом и материалом ТКО. В качестве газифицирующих агентов могут использоваться кислород, воздух, пар и диоксид углерода. Энергия для осуществления газификации выделяется при частичном сгорании (окислении) органических материалов.

Количество и состав синтез-газа и смол зависит от состава газифицирующего агента, температуры, типа газогенератора и состава исходного материала (отходов). Процесс газификации и скорость реакции зависят также и от пористости материала. Поэтому отходы, прошедшие пиролиз, лучше газифицируются, чем отходы, которые не прошли предварительной обработки.

Так же, как и процесс пиролиза, процесс газификации можно в общем случае разделить на несколько взаимосвязанных процессов:

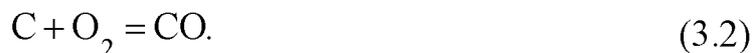
- сушка;
- полукоксование с выходом летучих и образованием твердого углеродосодержащего остатка (карбонизация);
- химическое реагирование углерода твердого остатка с газифицирующим агентом с образованием горючего газа и инертного твердого остатка.

Химизм процесса газификации ТКО можно упрощенно описать пятью основными химическими реакциями.

Газификация кислородом или воздухом (неполное горение):



Горение в кислороде:



Газификация углекислым газом (реакция Будуара):



Газификация водяным паром (реакция водяного газа):



Газификация водородом (гидрогазификация):



При получении синтез-газа с определенным соотношением CO/H₂ для последующего использования в реакциях синтеза имеет значение следующая реакция:



Повышение теплоты сгорания газа достигается путем метанизации:



Не все реакции протекают одновременно, некоторые развиваются последовательно друг за другом.

Восстановительные реакции газификации протекают с поглощением части теплоты, выделившейся в окислительных реакциях (3.1) и (3.2). При этом температура процесса определяется главным образом теплотой сгорания отходов и составом газифицирующего агента.

Процессы газификации, которые происходят при температуре выше $1\ 500^{\circ}\text{C}$, дают больший выход газа с низкой теплотой сгорания, чем процессы, протекающие в среднем температурном диапазоне ($900\text{--}1\ 500^{\circ}\text{C}$). При одинаковом исходном составе ТКО теплота сгорания газа, являющегося продуктом процесса газификации с применением воздушного дутья, ниже, чем теплота сгорания газа образующегося в процессе пиролиза отходов (из-за большого содержания азота в газифицирующем агенте) и составляет около $5\ 000\ \text{кДж/нм}^3$. Если в качестве газифицирующего агента используется кислород, теплота сгорания генераторного газа возрастает до $10\ 000\ \text{кДж/нм}^3$. Хотя теплота сгорания генераторного газа ниже, чем у пиролизного газа, выход газа на единицу массы отходов будет больше.

Можно выделить три основных типа газогенераторов:

- слоевые газогенераторы с противоточной подачей топлива и газифицирующего агента (газификация в плотном слое);
- газогенераторы с кипящим слоем;
- прямоточные газогенераторы (газификация пылевидного топлива в потоке).

Газогенераторы двух последних типов, несмотря на ряд преимуществ, для достижения высокой степени газификации требуют тонкого измельчения топлива и поэтому не нашли применения для термической переработки ТКО.

Слоевые газогенераторы предъявляют менее жесткие требования к фракционному составу топлива и, при наличии соответствующей предварительной подготовки отходов, могут быть использованы для газификации ТКО.

Благоприятное с точки зрения теплового режима противоточное движение газифицирующего агента и ТКО, реализованное в большинстве слоевых газогенераторов, образует по высоте слоя несколько зон с понижающейся снизу вверх температурой, в каждой из которых преобладают определенные процессы. В верхней зоне шахты загружаемые свежие ТКО подсушиваются встречным потоком горячего газа. Далее происходит полукоксование (карбонизация) сухих ТКО горячим газом с образованием продуктов пиролиза. К этой зоне примыкает зона газифи-

кации. В ней предварительно нагретые карбонизированные отходы вступает в эндотермическую реакцию с перегретым газифицирующим агентом. Остающийся малореакционный кокс сжигается в низлежащей зоне горения кислородом свежего газифицирующего агента, поставляя тепло, необходимое для газификации. В нижней зоне газогенератора располагается горячий слой золы (или шлака), через который вдувается газифицирующий агент.

Поток дутья нагревается при прохождении через горячий слой золы и зону горения, а образовавшийся в зоне полукоксования и подогрева сырой газ снова охлаждается, так что, кроме очень выгодного направления потоков, достигается отличное теплоиспользование.

По типу образующихся в процессе газификации твердых остатков слоевые газогенераторы делятся на установки с сухим и жидким шлакоудалением.

Исторически газификация и пиролиз возникли как технологии, предоставляющие возможность получения ценных компонентов химического сырья из органического топлива или из отходов. Только в этом случае пиролиз имеет технический и экономический смысл. Однако в связи с неравномерным составом ТКО, высокой влажностью и низким содержанием углерода, за счет пиролиза из них не могут быть получены ценные стабильные продукты. Потенциально ликвидный продукт пиролиза ТКО – синтетическая нефть – является крайне обводненной и токсичной, а наличие парафинов и высокое содержание примесей делают ее очистку практически неосуществимой. В то же время расход дополнительного топлива на поддержание процесса пиролиза ТКО достаточно велик. При энергетическом использовании продуктов пиролиза мы получаем опять же сжигание, но усложненное массой дополнительных стадий и оборудования, что только удорожает процесс термической переработки ТКО. Следует помнить, что при сжигании продуктов пиролиза требования к газоочистке остаются такими же, как и при прямом сжигании отходов. Поэтому приходится признать, что пиролиз ТКО не является рациональным способом их переработки. Те же свойства ТКО делают эти отходы малоподходящими и для газификации.

Пиролизные установки и газификаторы используют для переработки стабильных по составу отходов с высоким содержанием углерода, например, нефтешламов, пластиковых или резиновых отходов. Тем не менее, в некоторых странах процессы пиролиза и газификации все же находят применение и для ТКО в составе комбинированных технологий.

3.3.2. Комбинированные технологии с использованием процессов газификации и пиролиза

Технологии переработки с использованием процессов газификации и пиролиза наибольшее распространение получили в Японии, где ведущими фирмами-поставщиками оборудования являются Nippon Steel, Kobelco Eco, JFE, Hitachi Zosen, Ebara, Mitsui Engineering&Shipbuilding (MES). Три четверти всех заводов, где используют процессы газификации и пиролиза, укомплектованы установками этих фирм (рис. 3.21).

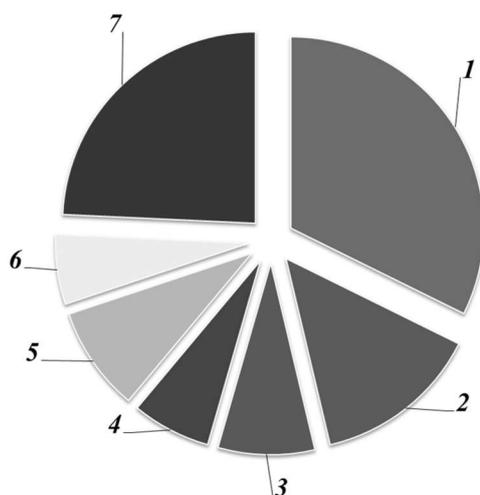


Рис. 3.21. Доля установок для термической переработки ТКО с использованием процессов пиролиза и газификации, изготовленных японскими фирмами

1 – Nippon Steel (32%); 2 – Kobelco Eco (14%); 3 – Hitachi Zosen (7%); 4 – MES (6%); 5 – Ebara (9%); 6 – JFE (8%); 7 – другие фирмы (24%)

Основу технологии крупнейшего поставщика оборудования – Nippon Steel составляет процесс газификации в плотном слое с жидким шлакоудалением и кислородно-воздушным дутьем (рис. 3.22).

Отходы в смеси с коксом и известняком поступают в верхнюю часть шахтного газогенератора и постепенно движутся в направлении, противоположному обогащенному кислородом дутью, в котором содержание O_2 составляет примерно 36%. Образующийся в процессе газификации синтез-газ отводится из верхней части газификатора, очищается в циклоне от твердых частиц и направляется в камеру сгорания.

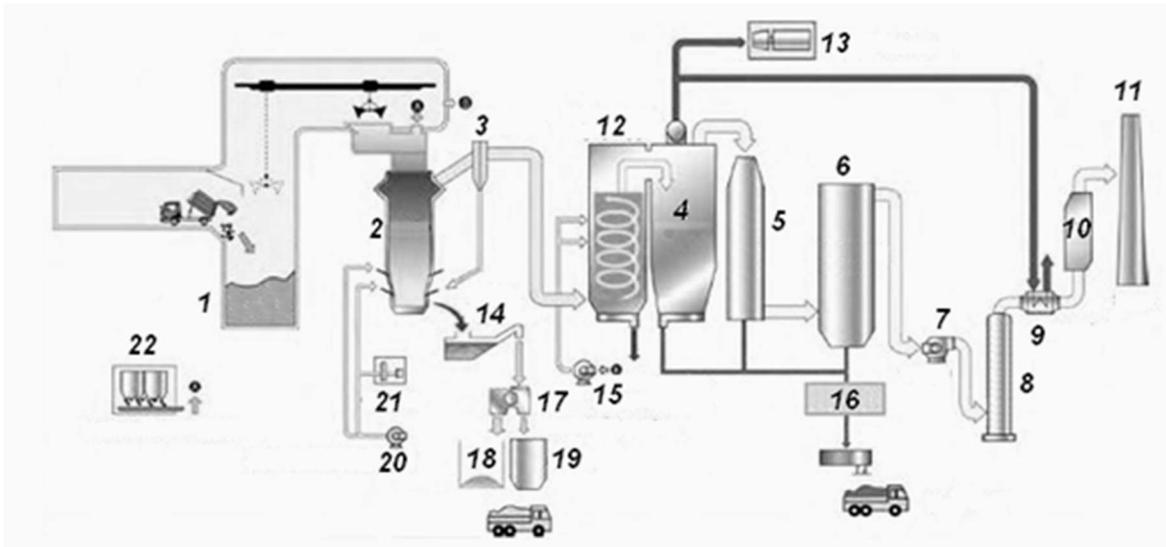


Рис. 3.22. Схема процесса термической переработке ТКО по технологии Nippon Steel:

- 1 – бункер ТКО; 2 – газификатор; 3 – циклон; 4 – котел;
 5 – газоохладитель; 6 – рукавный фильтр; 7 – дымосос; 8 – мокрый скруббер;
 9 – теплообменник; 10 – установка селективной каталитической очистки дымовых газов от оксидов азота; 11 – дымовая труба; 12 – камера сгорания; 13 – турбоагрегат;
 14 – гранулятор; 15 – дутьевой вентилятор; 16 – зола уноса;
 17 – магнитный сепаратор; 18 – шлак; 19 – металл;
 20 – дутьевой вентилятор; 21 – подача кислорода; 22 – кокс и известняк

Продукты сгорания синтез-газа с температурой приблизительно 1100°C поступают в котел-утилизатор, где генерируется перегретый пар, который может использоваться для выработки электроэнергии в турбоагрегате.

Шлак и металлы в расплавленном состоянии выводятся из пода газификатора, охлаждаются в водяном грануляторе и после их разделения направляются на дальнейшую переработку.

Установка позволяет перерабатывать различные отходы, в том числе, кроме ТКО, отходы свалок, золошлаковые остатки от сжигания ТКО, осадок сточных вод, медицинские отходы. Однако энергоэффективность технологии Nippon Steel значительно ниже по сравнению со сжиганием на колосниковой решетке или в кипящем слое из-за потребности в дополнительном топливе (коксе) и высоких затрат на собственные нужды. Кроме того, для обеспечения стекловидного состояния удаляемого шлака требуется подача в газификатор известняка.

В отличие от многих стран (например, ЕС), где повышение энергоэффективности преобразования энергетического потенциала отходов в энергию в настоящее время имеет приоритетное значение, в Японии одной из основных целей термической переработки отходов является ликвидация

существующих свалок и освобождение земель для дальнейшего использования. В основном именно поэтому предприятия с установками газификации получили в Японии некоторое распространение. Фирма Nippon Steel поставила оборудование для 42 заводов (87 установок), еще 2 находятся в стадии строительства. Производительность установок невелика и составляет от 2 до 11 т/ч. Самый крупный завод в городе Кутаюсю, префектура Фукусика, запущенный в 2007 г., состоит из трех линий мощностью 240 т/сутки и перерабатывает до 216 тыс. т отходов в год.

Некоторые данные по другим фирмам-поставщикам установок, использующие процессы пиролиза и газификации, помещены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Фирмы-поставщики установок,
использующие процессы пиролиза и газификации**

Наименование фирмы		Nippon Steel	Kobelco Eco	JFE	Hita-chi Zosen	Ebara	MES
Количество заводов		44	19	11	9	12	8
Количество установок		91	38	22	18	28	17
Производительность установки, т/ч		2–11	1,25–7,3	0,8–13	1–5,6	2–6,3	2,9–8,3
Производительность установки, т/сутки		50–265	30–175	19–314	25–135	48–150	70–200
Год пуска первого завода		1979	2000	2003	2002	2002	2000
Средняя производительность завода, тыс. т /год		74	43,8	57,9	47,7	56,8	76,5
Крупнейший завод, где установлено оборудование фирмы	Расположение	Кутаюсю, префектура Фукусика,	Sagamiha-ra	Фукуяме, Хиросима	Toyota Atchi	Kawagu-chi	Hamama-tsu, Shiru-oka
	тыс. т в год	216	160	94,2	121,5	126	135
	Количество ТЛ	3	3	1	3	3	2
	Производительность одной ТЛ, т/сутки	240	175	314	135	140	150

Анализ табл. 3.4 показывает, что эти установки имеют ограниченную производительность (до 13 т/ч), а средняя мощность заводов составляет 45–75 тыс. т отходов в год.

Следует отметить, что некоторые фирмы используют технологии, ранее разработанные в Европе, но в дальнейшем не получившие там применение из-за низкой энергоэффективности. Так, MES изготавливает оборудование по лицензии фирмы Siemens. Схема этой технологии, основу которой составляет пиролиз, представлена на рис. 3.23, а подробное описание – в [15].

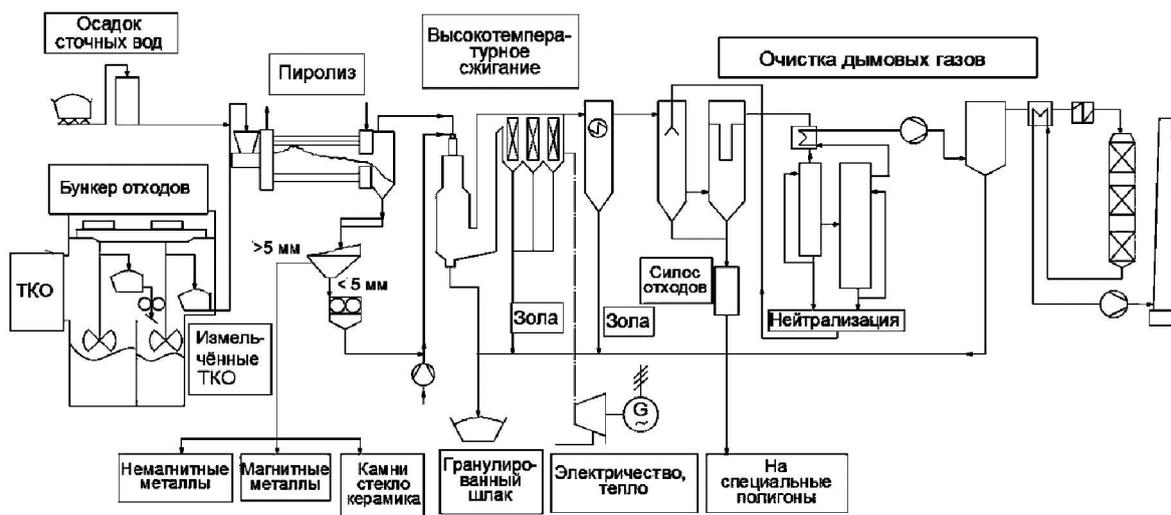


Рис. 3.23. Переработка отходов по технологии «SBV» (пиролиз-высокотемпературное сжигание), разработанной фирмой «Siemens»

Несмотря на полученные в результате опытной эксплуатации головного образца в Фюрте (Германия) хорошие экологические показатели, фирма-разработчик – Siemens из-за высоких эксплуатационных затрат отказалась от тиражирования своей разработки в Европе.

Компания JFE построила 7 заводов по лицензированной технологии Thermoselect (рис. 3.24). Эта технология была также разработана в Европе, но из-за высоких капитальных и эксплуатационных затрат она, как и технология фирмы Siemens, нигде кроме Японии не используется. Впрочем, и JFE от дальнейших поставок установок по технологии Thermoselect уже отказалась.

В Европе в качестве основного поставщиком газификационных установок можно назвать норвежскую фирму ENERGOS. Первый завод по технологии этой фирмы был введен в эксплуатацию в 1997 г. Схема типовой установки показана на рис. 3.25. Основу технологии составляют запатентованные конструкции камеры газификации, камеры сжигания и котла. Другое оборудование является стандартным.

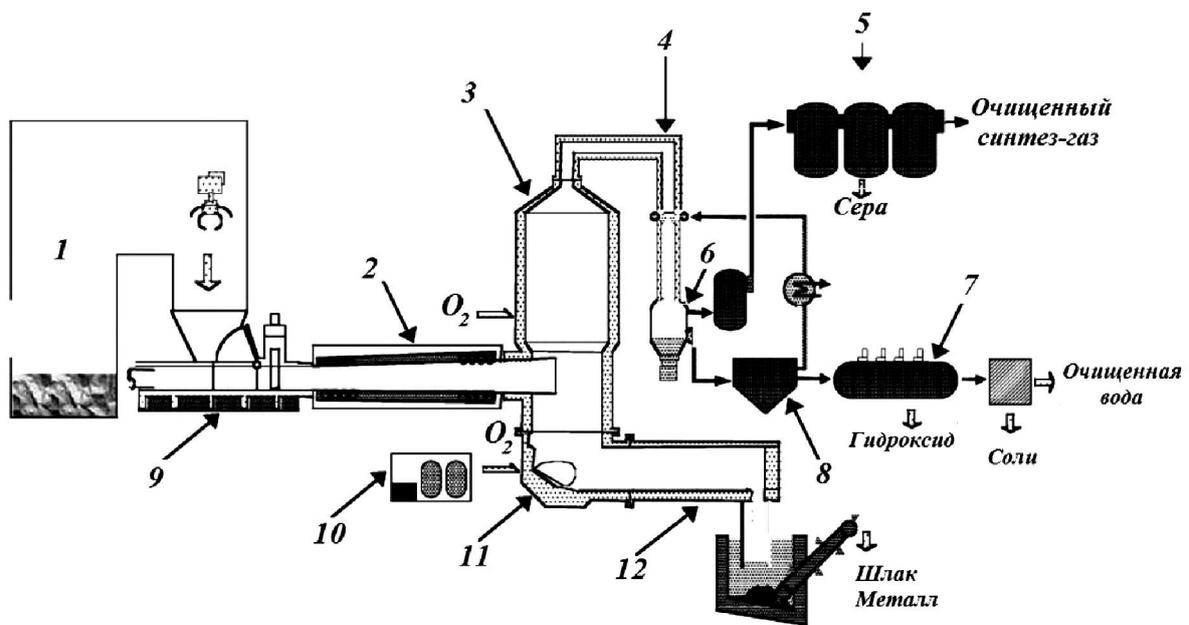


Рис. 3.24. Переработка отходов по технологии фирмы «Thermoselect S.A.»:
 1 – приемный бункер отходов; 2 – канал уплотнения и пиролиза; 3 – высокотемпературный реактор; 4 – охлаждение (закалка) синтез-газа; 5 – очистка синтез-газа;
 6 – мокрый скруббер; 7 – обработка сточных вод; 8 – отстойник; 9 – пресс;
 10 – кислородная станция; 11 – зона газификации и плавления шлака;
 12 – канал гомогенизации жидкого шлака

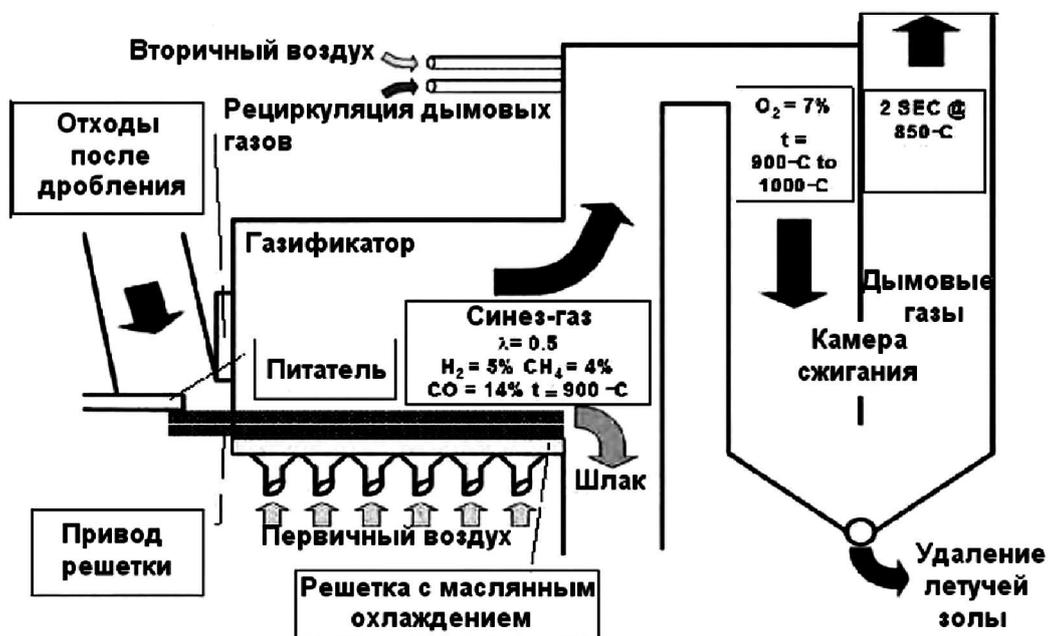


Рис. 3.25. Схема типовой установки фирмы ENERGOС

Всего в Европе по этой технологии было построено 8 заводов производительностью 30–78 тыс. т ТКО в год (5 в Норвегии, по одному в Германии и Великобритании). Еще три завода производительностью 144,4 тыс. т ТКО в год планировалось запустить в Великобритании: в Глазго, Милтон-Кейсе и Дерби.

Как уже говорилось, заводы для термической переработки ТКО методом газификации существенно проигрывают ТЭС на ТКО. Экологические преимущества также не очевидны. Поэтому в 2019 г. принято решение о прекращении строительства завода в Дерби, а ранее запущенная в эксплуатацию установка ENERGOS на заводе «Isle of White Plant» (Великобритания) была преобразована в традиционную установку для сжигания ТКО на колосниковой решетке.

Таким образом, технологии газификации и пиролиза для термической переработки ТКО используются преимущественно только в Японии с целью расширить спектр перерабатываемых отходов в одной установке и ликвидации свалок. С точки зрения энергетической утилизации ТКО газификация и пиролиз существенно проигрывают не только традиционному слоевому сжиганию на колосниковой решетке, но и сжиганию в кипящем слое.

3.4. Другие методы термической переработки ТКО

Основными методами термической переработки ТКО являются слоевое сжигание на механических колосниковых решетках и в кипящем слое, а также с использованием пиролиза и газификации. Большинство предприятий для термической переработки ТКО применяют технологию сжигания на колосниковой решетке, примерно 8% предприятий сжигают отходы в кипящем слое. Доля заводов, где используют газификацию или пиролиз ТКО, составляет около 5%. Другие методы (сжигание во вращающихся барабанных и металлургических печах, с использованием плазмотронов) находят ограниченное применение, как правило, на установках небольшой мощности. Тем не менее, для общей информации ниже приводятся краткие сведения и об этих технологиях.

3.4.1. Трубчатые (барабанные) печи

Трубчатые (барабанные) печи обычно используют для обезвреживания опасных отходов (медицинских, биологических и др.) и в современной практике термической утилизации ТКО применяют довольно редко. Типовая схема технологического процесса с использованием вращающейся печи для сжигания ТКО приведена на рис. 3.26.

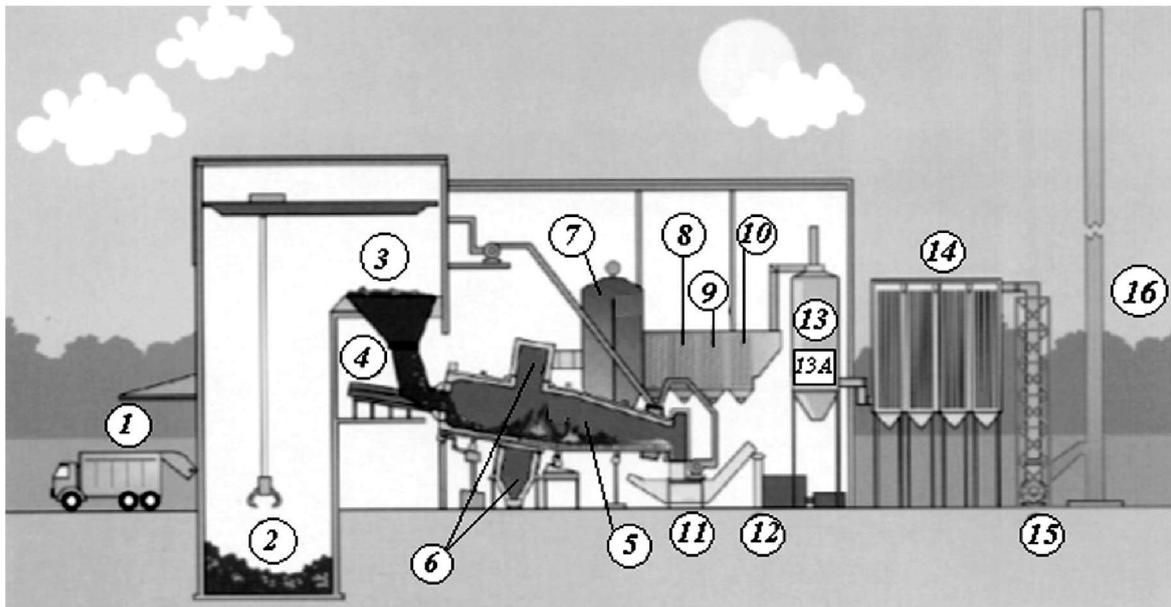


Рис. 3.26. Схема технологического процесса термической утилизации ТКО с использованием вращающейся печи Laurent Bouillet на заводе MID-MAINE WASTE ACTION CORPORATION (AUBURN, MAINE):

- 1 – прием мусоровозов; 2 – загрузка ТКО; 3 – загрузочная воронка; 4 – питатель ТКО; 5 – вращающаяся печь; 6 – выход газов; 7 – котел-утилизатор; 8 – пароперегреватель; 9 – испаритель; 10 – экономайзер; 11 – шлаковая ванна; 12 – шлаковый бункер; 13 – полусухой абсорбер; 13А – ввод активированного угля; 14 – тканевый рукавный фильтр; 15 – дымосос; 16 – дымовая труба

Имеются сведения об эксплуатации установок, сжигающих ТКО в барабанных печах, по крайней мере, на 16 заводах в Европе и на 6 в США. В Японии на 15 предприятиях для термической переработки ТКО также используют барабанные печи.

Основной недостаток применения барабанных печей для сжигания ТКО – ограничение по производительности: как правило, до 10 т/час. Средняя производительность японских установок еще меньше – 7 т/ч. Кроме того, низкая удельная тепловая и массовая нагрузка топочного объема барабанных печей приводит к высоким капитальным и эксплуатационным расходам. Футеровка печи при вращении находится в условиях частой смены температуры, что вызывает образование в ней трещин и быстрый выход из строя. В печах старой конструкции с целью уменьшения массы барабана футеровку выполняли небольшой толщины, что вызывало большие тепловые потери, которые, наряду с высокими температурами отходящих газов, обуславливают низкий КПД агрегата.

3.4.2. Сжигание в металлургических печах

Идея переработки ТКО в пирометаллургических печах возникла давно. Еще в 60-х гг. был выполнен большой объем опытных плавов ТКО в электропечи в Германии. Испытания проводились в широком диапазоне температур (1 100–1 500°C), устранялись конструктивные недостатки печи, упрощалась аппаратура и др. Однако эти исследования (как и некоторые другие пирометаллургические подходы к данной проблеме) не нашли дальнейшей промышленной реализации за рубежом. В России же в 90-х годах прошлого века в создавшихся тогда тяжелых экономических условиях интерес к этой проблеме проявили специалисты, многие годы занимавшиеся разработкой различных печей, которые и стали приспособлять эти печи для сжигания ТКО.

На уровне предложений известно достаточно много модификаций технологий сжигания ТКО в металлургических печах, которые в зависимости от характера процесса различают:

- с использованием доменных печей с добавлением угля;
- с использованием обогащенного кислородом дутья (процесс Ванюкова);
- с использованием в качестве дутья природного газа (флюминг-процесс);
- с использованием электрошлакового расплава.

Однако следует отметить, что обезвреживание отходов в металлургических печах, целесообразно в том случае, когда необходимо перерабатывать опасные отходы (промышленные, больничные), накопленные на полигонах «лежалые» отходы, а также ЗШО, образующиеся при сжигании ТКО. Возможно, эту технологию целесообразно использовать в районах с развитой металлургической инфраструктурой. Однако для энергетической утилизации ТКО такие технологии не целесообразны.

3.4.3. Технологии с использованием плазмотронов

Под плазменной переработкой понимают процесс, при котором вещество при температуре порядка 6–9 тыс. °С переходит в состояние плазмы, то есть происходит «ионизация» его атомов за счет потери электронов с внешней орбиты. При последующем охлаждении плазмы и создании определенных условий происходит образование новых химических соединений, например, синтез-газа, свободного от вредных веществ. В нашем случае, когда говорят о плазменных технологиях пере-

работки отходов, то имеют в виду технологии высокотемпературных (в лучшем случае до 2 000°C) переработки и обезвреживания отходов, в которых генерируемая в плазмотронах плазма выступает в роли лишь одного из источников энергии. На основе такого плазменного нагрева могут быть реализованы различные процессы – например, сжигание или газификация.

В [16, 17] приведено описание известных технологий переработки ТКО с применением в качестве источника нагрева генератора низкотемпературной плазмы (плазмотрона). В [17] сообщается, что таких работающих установок, с производительностью более 100 т/сутки, всего лишь четыре, и ТКО на них перерабатывают в смеси с промышленными отходами. Лишь одна в Канаде, производительностью 37,5 тыс. т год (5 т/ч), которая эксплуатируется как демонстрационная, специализируется на переработке только ТКО.

Основными сдерживающими факторами, препятствующими широкому использованию так называемых плазменных технологий для переработки отходов, являются недостаточно большой ресурс работы генераторов низкотемпературной плазмы – плазмотронов, а также тот факт, что плазменный дуговой разряд является относительно локальным источником нагрева, поэтому для обеспечения удовлетворительного теплопереноса перерабатываемый материал должен быть тщательно измельчен. Получаемый синтез-газ необходимо подвергать глубокой очистке от вредных примесей, которые образуются в восстановительной среде при высоких температурах: сероводорода, аммиака, фосфина, арсина, хлористого водорода и др.

Применять такие плазменные технологии для энергетической утилизации неопасных отходов не целесообразно из-за низкой энергоэффективности процесса. В [18] сравнивается энергетическая эффективность (в пересчете на суммарную энергию горючих компонентов получаемого синтез-газа) процессов плазменной и автотермической газификации при температуре 1 400 К для одного и того же вида топлива (отхода). Показано, что дополнительный энергетический выход по синтез-газу, достигаемый за счет «плазмы», при существующих методах преобразования энергии, даже без учета потерь с охлаждением, балластирования рабочей смеси в реакторе и т.д., не может покрыть затрат электроэнергии. Установлено также, что дальнейшее повышение температуры сопровождается лишь незначительным увеличением химической энергии синтез-газа, т.е. с энергетической точки зрения не эффективно.

3.5. Наилучшие доступные технологии термической переработки отходов

Разработка алгоритма выбора наилучшей доступной технологии (НДТ) термической переработки ТКО, т.е. технологии обеспечивающей экологически безопасную работу с наименьшими затратами, достаточно сложная и неоднозначная задача. Очевидно, что поиск решения должен базироваться на ряде взаимосвязанных, но иногда противоречивых критериев. Кроме того, следует заранее определить приоритеты принимаемых во внимание факторов. Критерии и их приоритеты должны объективно отражать как реальное положение вещей в области переработки отходов, так и интересы предприятия.

Первый ключевой критерий – без сомнения, критерий обеспечения экологической безопасности всего процесса термической переработки ТКО. Потенциальные воздействия установок для термической переработки отходов на окружающую среду связаны с такими факторами как:

- выбросы в атмосферу (включая запах и парниковые газы) и сброс в водные объекты;
- образование твердых остатков после сжигания;
- технологический шум и вибрация;
- потребление сырья (реагентов);
- образование летучих нестойких выбросов, в основном в местах хранения отходов;
- нештатные ситуации при хранении/погрузочно-разгрузочных операциях/обработке отходов.

Второй критерий – это совокупность технико-экономических характеристик рассматриваемых вариантов технологий и оборудования для термической переработки ТКО. Важными в данном случае являются показатели реализуемости и работоспособности:

- наличие современных серийных промышленных образцов;
- положительный опыт надежной эксплуатации;
- маневренность (время пуска – остановка в разумных пределах);
- возможность использования АСУ ТП.

К этому же критерию относятся показатели масштабируемости и повсеместного внедрения:

- диапазон возможной производительности;
- необходимость доработки технологии при отклонении производительности от проектной;

- необходимость использования дополнительных ресурсов, в т.ч. флюса, кислорода, необходимых для процесса;
- доступность реагентов для очистки газов;
- степень локализации;
- требования к подготовке ТКО.

В качестве третьего основного критерия следует рассматривать стоимостные показатели. Наконец, *четвертый критерий* – социальные аспекты.

На основании экспертной оценки, выполненной российскими и зарубежными специалистами, установлено, что для заданных исходных условий и принятых ограничений наиболее оптимальной является технология сжигания ТКО на колосниковой решетке.

Сравнительный анализ тепловых процессов, лежащих в основе базовых технологий термической переработки ТКО, результаты которого приведены в [19], также показал, что технологии сжигания в колосниковых топках и в топках с кипящим слоем являются приоритетными, поскольку имеют более высокий коэффициент энергоиспользования по сравнению с другими технологиями. Под коэффициентом энергоиспользования в данном случае понимается отношение электроэнергии, которую можно выработать путем использования энергопотенциала отходов к общим энергозатратам на функционирование всего завода.

К основным преимуществам слоевого сжигания ТКО на колосниковых решетках и в кипящем слое следует также отнести:

- меньшие по сравнению с другими технологиями капитальные и эксплуатационные затраты;
- высокая (по сравнению с другими технологиями) степень надежности.

За рубежом результаты поиска оптимальной технологии нашли отражение в Справочнике по НДТ «Сжигание отходов» [20]. При подготовке Справочника принимались во внимание положения Директивы 2000/76/ЕС «О сжигании отходов» [13]. В Справочнике анализируются практически все известные методы термической переработки отходов, включая пиролиз и газификацию (кроме совместного сжигания отходов с другими видами топлива в обычных котлах и в цементных печах).

В Справочнике рассматриваются технологии термической переработки не только ТКО, но и RDF (специально подготовленных ТКО и других отходов), опасных отходов, осадка сточных вод, медицинских отходов.

С учетом минимального воздействия на окружающую среду, а также того, что в ЕС выработку энергии из отходов рассматривают как одно из перспективных направлений в области охраны окружающей среды, в [20] предлагают конкретные технологии для каждого вида отходов (табл. 3.5). Так, например, для смешанных ТКО наиболее предпочтительными являются технологии их сжигания на колосниковых решетках и в вихревом кипящем слое.

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что для сжигания смешанных ТКО в качестве приоритетной следует рассматривать технологию сжигания на механических колосниковых решетках.

Таблица 3.5

Наилучшие доступные технологии для термической переработки различных видов отходов, включая ТКО (по данным [20])

Технология	Смешанные ТКО	Подготовленные ТКО	Опасные отходы	Осадок сточных вод	Медицинские отходы
Слоевое сжигание на ПКР	Широко применяется	Широко применяется	Обычно не применяется	Обычно не применяется	Редко применяется
Слоевое сжигание на ОПКР	Широко применяется	Редко применяется	Редко применяется	Обычно не применяется	Редко применяется
Слоевое сжигание на ВКР	Широко применяется	Применяется	Обычно не применяется	Обычно не применяется	Обычно не применяется
Сжигание в пузырьковом кипящем слое	Обычно не применяется	Применяется	Обычно не применяется	Широко применяется	Обычно не применяется
Сжигание в ЦКС	Обычно не применяется	Применяется	Обычно не применяется	Применяется	Обычно не применяется
Сжигание в ВКС	Применяется	Применяется	Обычно не применяется	Обычно не применяется	Редко применяется
Пиролиз	Редко применяется				
Газификация	Редко применяется				
Сжигание в барабанных печах	Редко применяется	Применяется	Широко применяется	Применяется	Широко применяется
Сжигание в печах с неподвижным подом	Обычно не применяется	Обычно не применяется	Применяется	Обычно не применяется	Широко применяется

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные методы термической переработки ТКО. Какие из них получили наибольшее распространение в мире?

2. Расскажите об особенностях слоевого сжигания отходов на механических КР. Назовите основные типы колосниковых решеток, используемых для сжигания ТКО. В чем принципиальное отличие сжигания топлива на ПКР от сжигания на ОПКР?

3. Перечислите основные типы топок для сжигания отходов. Для чего применяют и каким образом размещают горелки для сжигания дополнительного топлива (природного газа)? Как осуществляют подогрев дутьевого воздуха в топках для сжигания ТКО?

4. Как определяют тепловое напряжение зеркала горения решетки и тепловое напряжение топочной камеры? Назовите предельные значения этих величин для топок, сжигающих ТКО.

5. Назовите отличительные особенности процесса сжигания отходов в кипящем слое. В чем отличие топок, где сжигают топливо в пузырьковом кипящем слое, от котлов с ЦКС? Какой вид кипящего слоя наиболее подходит для сжигания смешанных ТКО?

6. Опишите процесс термической переработки в установках со сжиганием ТКО в ВКС.

7. В чем отличие технологий термической переработки отходов с использованием процессов пиролиза и газификации от технологий с использованием слоевого сжигания (на решетках или в кипящем слое)?

8. Почему технологии термической переработки отходов с использованием процессов пиролиза и газификации не получили широкое распространение для ТКО?

9. Какие другие технологии применяют для термической переработки отходов? Почему эти технологии практически не используют для термической переработки ТКО?

10. Что такое наилучшие доступные технологии? Какие технологии являются наилучшими доступными для энергетической утилизации ТКО?

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТКО НА ТЭС

4.1. Котлы для утилизации теплоты газообразных продуктов сгорания ТКО

Специфика котельных агрегатов для сжигания ТКО, по сравнению с традиционными котлами, обусловлена необходимостью сжигать отходы с большими избытками воздуха ($\alpha \sim 1,8$) из-за широкого диапазона изменения теплоты сгорания и элементного состава отдельных компонентов ТКО; обязательной выдержкой газообразных продуктов сгорания при температуре более 850°C в течение 2 секунд и более для деструкции органических загрязнителей, в первую очередь, ПХДД/ПХДФ; ограничением температуры дымовых газов на входе в конвективные поверхности (не более 750°C) по условиям минимизации шлакования этих поверхностей; поддержанием оптимальной для работы системы газоочистки температуры дымовых газов на выходе из котла (обычно $180\text{--}200^{\circ}\text{C}$). Соответственно основными задачами котла являются:

- обеспечение безопасного, устойчивого и эффективного сжигания отходов за счет конфигурации нижней части котла (камеры сгорания);
- передача тепла дымовых газов воде, которая затем нагревается, испаряется, а пар перегревается до требуемой температуры;
- охлаждение дымовых газов с температуры $850\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ до $180\text{--}200^{\circ}\text{C}$, т.е. до температуры, при которой процессы очистки газов происходят в оптимальном режиме, а низкотемпературная коррозия поверхностей нагрева сведена к минимуму.

Конфигурация котлов может быть различной и в зависимости от компоновки конвективных поверхностей нагрева (рис. 4.1) их подразделяют на вертикальные и горизонтальные.

В вертикальном котле все конвективные поверхности нагрева размещены в вертикальных газоходах (рис. 4.1, б). Эти газоходы экранированы, как правило, газоплотными испарительными панелями и выполняются совмещенными. При наличии двух конвективных газоходов, между ними оставляют свободное пространство, обеспечивая доступ для ремонта пакетов экономайзера и конвективного пароперегревателя.

В горизонтальном котле либо все конвективные поверхности нагрева располагаются в горизонтальном газоходе, расположенном после радиационной части, выполненной в виде одного или нескольких совмещенных вертикальных газоходов (рис. 4.1, в, г, д), либо экономайзер вынесен в отдельный вертикальный газоход (рис. 4.1, а, е). Вертикальные котлы (рис. 4.1, б) по сравнению с горизонтальными (рис. 4.1, в, г, д) за-

нимают меньшую площадь, имеют меньшую металлоемкость и, соответственно, стоимость, хорошее обтекание дымовыми газами всех конвективных поверхностей нагрева, меньшие затраты на удаление золы. В свою очередь, горизонтальные котлы более ремонтпригодны; менее подвержены эрозионному и коррозионному воздействию со стороны дымовых газов; имеют более низкое аэродинамическое сопротивление по газовому тракту; меньшие эксплуатационные затраты, связанные, прежде всего, с остановками на очистку поверхностей нагрева и на ремонт; более продолжительный период между остановками котла на очистку (примерно 8 000 часов по сравнению с вертикальными, составляющий 4 000–6 000 ч).

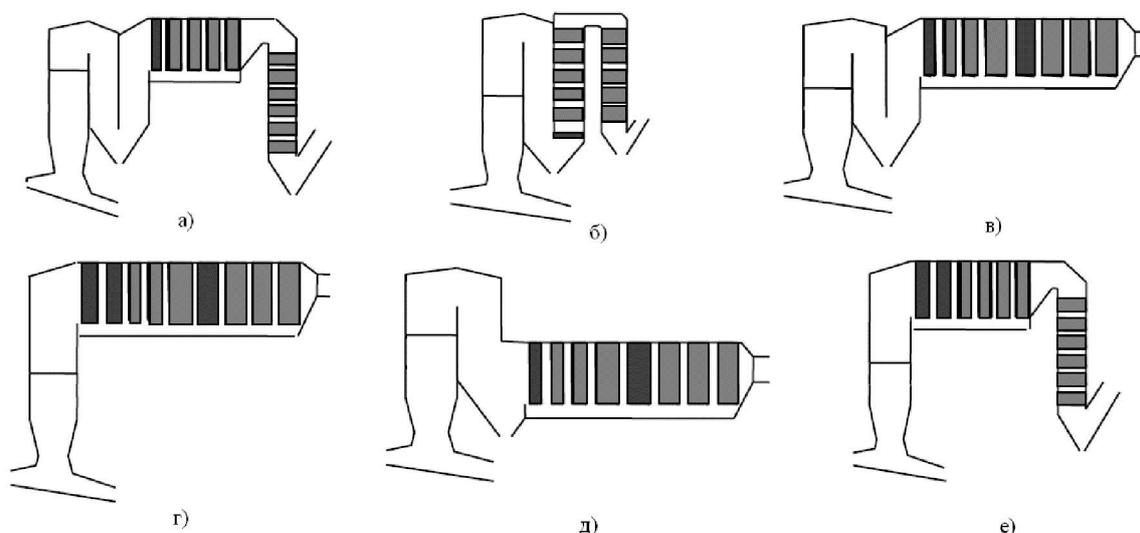


Рис. 4.1. Различные варианты компоновки поверхностей нагрева в котлах для сжигания ТКО

На предприятиях для термической переработки ТКО используют котлы различной конфигурации и производителей. Наиболее распространенные конструкции котлов фирмы *Baumgarte* представлены на рис. 4.2.

Котлы этой фирмы могут компоноваться решетками различных типов. Например, рис. 4.2 котел оснащен наклонной ПКР, а на рис. 4.3 – горизонтальной решеткой конструкции *Widmer+Ernst*.

Конструкции котлов, поставляемых фирмами КНИМ и *Fisia Babcock Environment GmBH* представлены в [1].

Многолетний опыт эксплуатации котлов этих и других фирм показывает, что наиболее предпочтительными для сжигания смешанных ТКО являются конструкции котлов, в которых заложены следующие основные принципы:

- перед конвективными поверхностями располагаются три пустых газохода (рис. 4.1, а, в);

- трубы выше футеровки в первом газоходе котла должны быть изготовлены из легированной стали или покрыты наплавкой;
- температура дымовых газов перед конвективными поверхностями должна быть не выше 700–750°C;
- перед первой ступенью пароперегревателя располагается защитный испаритель;
- температура дымовых газов перед пароперегревателем не должна превышать 650°C;
- конвективные поверхности пароперегревателя располагаются в горизонтальном газоходе для удобного обслуживания и ремонта;
- температура перегрева пара – 400–420°C;
- давление пара – 4,0–6,5 МПа;
- для регулирования температуры перегрева пара используется система впрыска;
- для всех радиационных и конвективных поверхностей применяют очистку.

Именно этими правилами руководствуются, как правило, при проектировании котлов. Тем не менее, бывают и исключения. Например, на ТЭС на ТКО West Palm Beach (Флорида, США), введенной в эксплуатацию в 2015 г., применена конструкция котла, отличающаяся от традиционных (рис. 4.4).

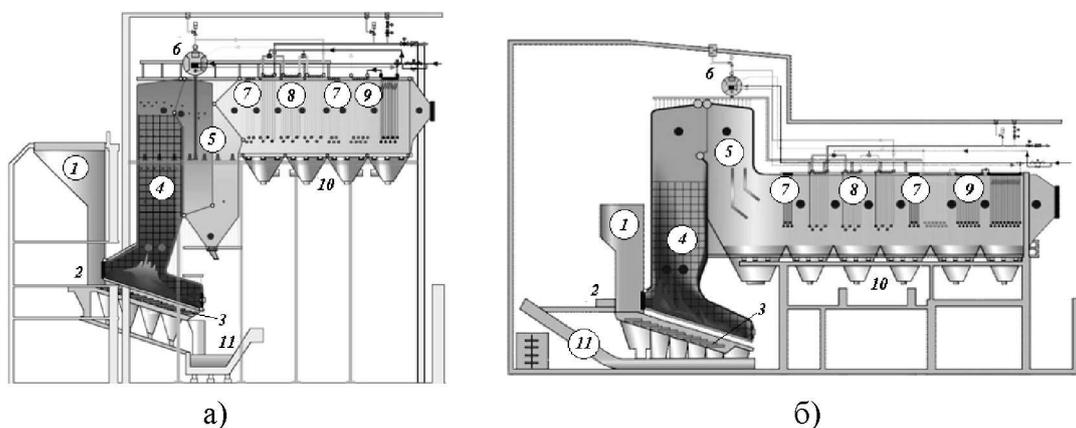


Рис. 4.2. Котлы фирмы Baumgarte:

- а) для сжигания неподготовленных ТКО;
 б) для сжигания подготовленных отходов (RDF); 1 – загрузочная воронка;
 2 – питатель; 3 – колосниковая решетка; 4 – зона горения;
 5 – радиационные газоходы; 6 – барабан котла; 7 – испаритель;
 8 – пароперегреватель; 9 – экономайзер; 10 – бункеры золы;
 11 – система удаления шлака

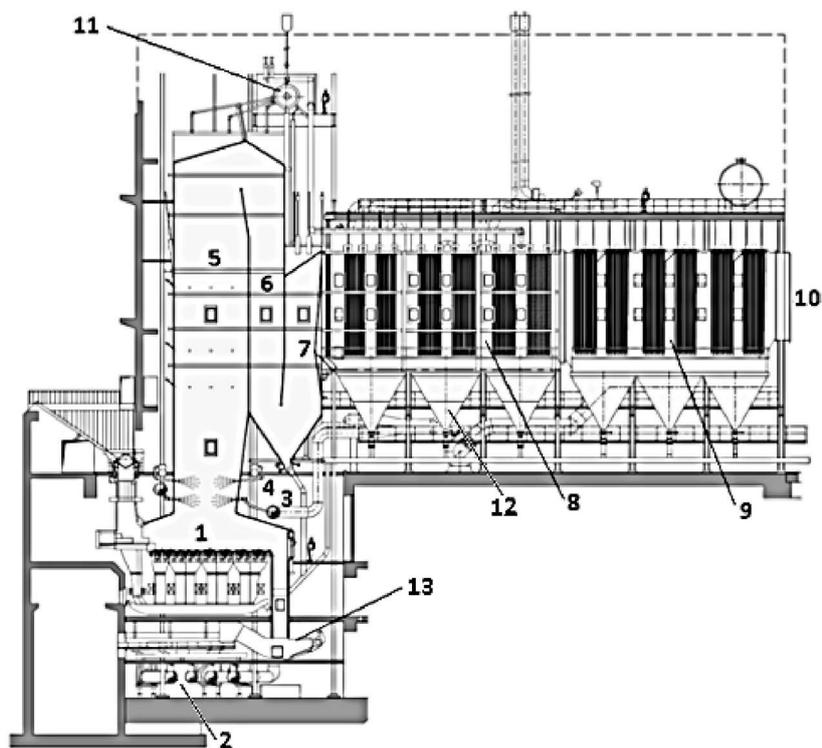


Рис. 4.3. Котел ТЛ 5,6 завода Afval Energie Bedrijf (АЕВ) с горизонтальной решеткой Martin:

1 – ПКР; 2 – система подачи первичного воздуха; 3 – система подачи вторичного воздуха и газов рециркуляции; 4 – третичный воздух; 5 – 1-й газоход; 6 – 2-й газоход; 7 – 3-й газоход; 8 – пароперегреватель; 9 – экономайзер; 10 – выход дымовых газов из котла; 11 – барабан котла; 12 – бункеры золы; 13 – шлакоудалитель

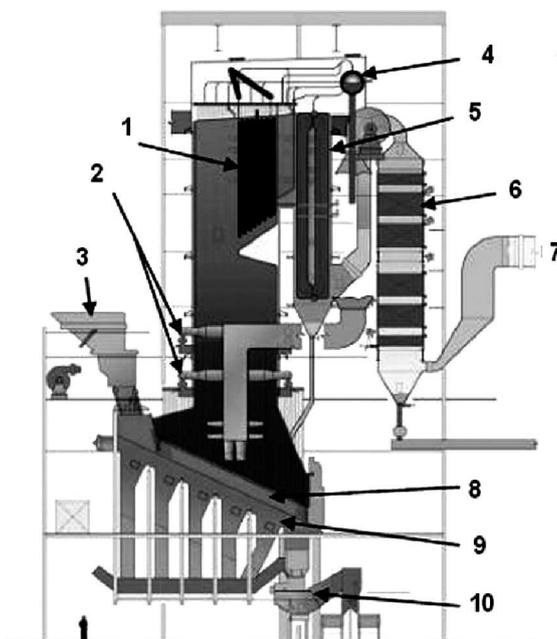


Рис. 4.4. Котел конструкции V&WStirling® для сжигания ТКО на ТЭС West Palm Beach (Флорида, США):

1 – пароперегреватель; 2 – система подачи вторичного воздуха; 3 – загрузочная воронка; 4 – барабан котла; 5 – испарительные ширмы; 6 – экономайзер; 7 – уходящие дымовые газы; 8 – водоохлаждаемая зона; 9 – ПКР DynaGrate®; 10 – выгрузка шлака

Эта ТЭС электрической мощностью 95,3 МВт позволяет перерабатывать примерно 960,0 тыс. отходов в год. На трех ТЛ, входящих в ее состав, генерируется 386,2 т/ч пара с параметрами 443°C и 6,3 МПа. Для защиты от коррозии поверхности нагрева, особенно пароперегревательные, покрыты наплавкой Inconel® [10].

Окончательный выбор профиля котельного агрегата и его технико-экономических показателей осуществляется на стадии проектирования конкретной ТЭС. При этом учитывается, что эффективность ТЭС на ТКО во многом определяется надежной и эффективной работой именно котла.

4.2. Метод оценки тепловой эффективности котлов для сжигания ТКО

Основу метода определения тепловой эффективности котлов для сжигания ТКО составляют балансовые испытания, суть которых заключается в сведении теплового баланса сжигательного и утилизационного оборудования на основе измеренных параметров. Балансовые испытания проводят, как правило, без сжигания в котле дополнительного топлива и без распыла в котел реагентов для уменьшения NO_x. Тепловой коэффициент полезного действия (η_T) определяется комбинированным методом – с определением тепловой мощности установки, т.е. теплоты, отведенной рабочей средой (паром и продувочной водой), и всех тепловых потерь, по формуле:

$$\eta_T = \frac{Q_K}{Q_K + \sum_{i=2}^6 Q_i}, \quad (4.1)$$

где Q_K – тепловая мощность установки, кДж/ч, определяется как:

$$Q_K = (h_{пе} - h_{пв}) \cdot D + D_{пр}(h' - h_{пв}), \quad (4.2)$$

где $h_{пв} = f(t_{пв}, P_{пв})$; $h_{пе} = f(t_{пе}, P_{пе})$ – энтальпии рабочей среды на входе (питательной воды) и выходе (перегретого пара), определяемые по температуре и давлению рабочей среды, кДж/кг; D – расход рабочей среды (паропроизводительность), кг/ч; $D_{пр}$ – расход воды на продувку, кг/ч; h' – энтальпия кипящей воды при давлении в барабане, кДж/кг.

Потери тепла с уходящими газами (Q_2), химической неполнотой сгорания (Q_3) и с теплом шлака (Q_6) определяются принятыми в теплоэнергетике методами [14, 21], с уточнениями, приведенными в [1]. Потери тепла от механической неполноты сгорания (Q_4), кДж/ч, с учетом специфических свойств образующихся золошлаковых остатков, оцениваются по формуле:

$$Q_4 = B_{\text{шл}} \cdot \frac{100 - W_{\text{шл}}^r}{100} \cdot \left[19600 \bar{m}_M \cdot (1 - A_M^d) + 32700 \bar{m}_C \cdot (C_{\text{шл,с}} - 0,22 C_{\text{шл,с}}^{2/3}) \right] + 32700 B_3 C_{\text{ун}}, \quad (4.3)$$

где $B_{\text{шл}}$ и B_3 – расходы шлама и золы, кг/ч; $W_{\text{шл}}^r$ – влажность шлама, %; \bar{m}_M , \bar{m}_C – удельные массовые доли мягкой и силикатной частей шлама (см 5.4.1); A_M^d – зольность мягкой части, определяемая по результатам исследований потерь при прокаливании; $C_{\text{шл,с}}$ и $C_{\text{ун}}$ – содержание горючих в силикатной части шлама и золе на сухую массу, определяемые термобариметрическим методом.

Потери тепла от наружного охлаждения (Q_5), кДж/ч, которые для котельных агрегатов, сжигающих отходы, особенно небольшой производительности, могут достигать 10 % и выше, следует определять по формуле:

$$Q_5 = 3,6 \cdot q_{5,в} (S_B + 1,075 S_T), \quad (4.4)$$

где S_B , S_T – площади вертикальной и горизонтальной наружных поверхностей котла, м²; $q_{5,в}$ – удельный тепловой поток через вертикальную наружную поверхность, Вт/м², вычисляемый по формуле:

$$q_{5,в} = 0,043 \cdot (\lambda \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \Delta T^{\frac{4}{3}} / \nu^{\frac{2}{3}}) + 5,39 \cdot 10^{-8} (T_{\text{ст}}^4 - (T_{\text{ст}} - \Delta T)^4) \quad (4.5)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м·К); Pr – число Прандтля; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Величины λ , Pr , ν определяются по средней величине между температурой наружной поверхности котла ($T_{\text{ст}}$) и окружающего воздуха ($T_{\text{окр}}$).

Температурный перепад (ΔT) вычисляется как:

$$\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{окр}}. \quad (4.6)$$

Для вертикальных поверхностей нагрева котла с характерным линейным размером L больше 3 м и для горизонтальных поверхностей с $L > 0,3$ м величина $q_{5,в}$ может определяться из рис. 4.5 по температуре наружной поверхности ($T_{\text{ст}}$) и температурному перепаду между этой температурой и температурой окружающей среды (ΔT).

Для вертикальных поверхностей характерным линейным размером является высота. Для горизонтальной плоской поверхности, обращенной вверх, характерный линейный размер равен отношению площади поверхности к периметру.

Современные котельные агрегаты, в том числе, установленные на российских заводах, имеют достаточно высокую тепловую эффектив-

ность: тепловой коэффициент полезного действия при сжигании ТКО составляет 80–90%. В тоже время электрический КПД из-за низких параметров пара на некоторых предприятиях очень низкий: 15% и ниже.

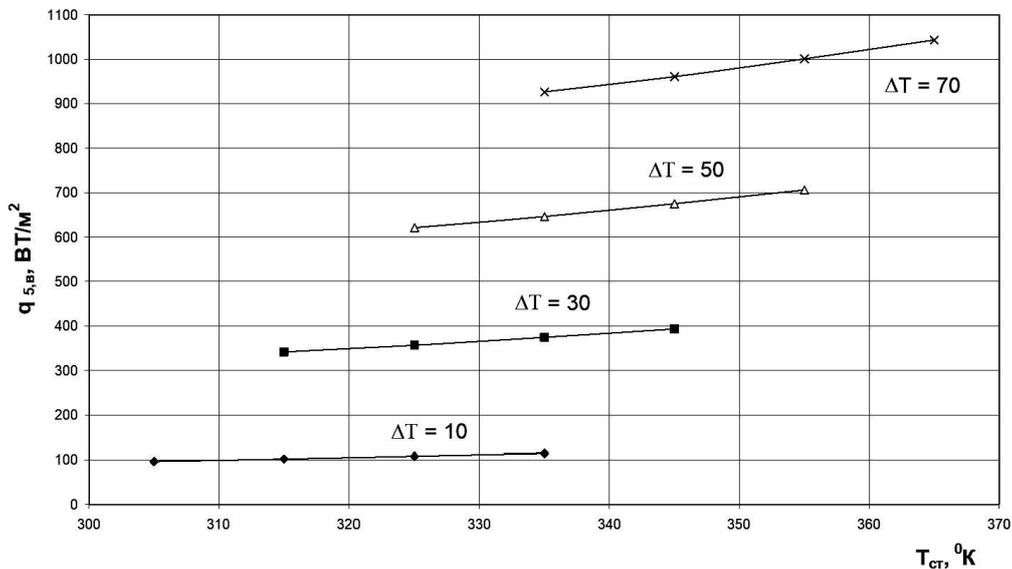


Рис. 4.5. Удельные тепловые потери от наружного охлаждения вертикальных поверхностей нагрева с высотой более 3 м и Pr более 0,5

Таким образом, основные способы повышения эффективности энергетической утилизации ТКО связаны не столько с увеличением КПД котла, сколько с увеличением электрического КПД и возможностью работы ТЭС на ТКО в когенерационном режиме.

4.3. Основы расчета материального и теплового балансов процесса термической переработки с генерацией пара

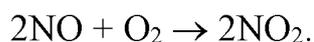
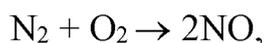
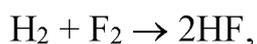
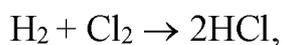
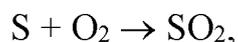
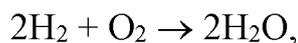
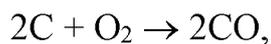
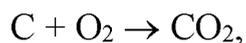
Расчет материального и теплового балансов обычно выполняют на стадии проектирования с целью определения паропроизводительности, расхода реагентов, необходимости сжигать дополнительное топливо для последующего выбора оборудования тепловой схемы и системы газоочистки. Расчеты проводят для одной технологической линии в номинальном режиме и в режиме с предельно допустимой производительностью для отходов с максимально и минимально возможной теплотой сгорания.

4.3.1. Методика расчета

Расчет изменения массы исходных веществ, поступающих в различные аппараты и участки технологической линии, и образующихся продуктов химических реакций проводится на основании закона сохранения массы с использованием формул основных химических реакций, протекающих в данном аппарате или участке тракта. Расходы перегретого пара, продувочной и питательной воды, а также воды в систему газоочистки определяются расчетом теплового баланса аппаратов.

Расчет массовых потоков на выходе из котла

В расчете учитываются реакции окисления горючих элементов массы ТКО в рабочем состоянии, реакции образования основных загрязняющих веществ и реакция связывания оксида азота карбамидом (см далее формула (5.1)):



Количество серы, хлора и фтора, принявшее участие в реакциях, определяется как разность количеств, поступивших с ТКО, и количеств перешедших в твердые остатки (шлак, зола). Распределение по потокам твердых продуктов процесса горения производится в соответствии с экспериментальными данными, измеренными на аналогичных предприятиях. Для слоевого сжигания отечественных ТКО на колосниковой решетке допускается принимать, что на выходе из котла в газовой фазе содержится не более 15% соединений привнесенной с ТКО серы (SO_2), примерно 80% хлора (HCl) и 75% фтора (HF).

Расчет паропроизводительности и теплового баланса котла

Расход перегретого пара, кг/ч, определяется по следующей расчетной зависимости:

$$D = \frac{(BQ_i^r + B_{\Gamma}Q_i^d + Q_{\text{расп}}) - D_{\text{пр}} \cdot (h' - h_{\text{пв}}) - \sum Q_i}{(h_{\text{пе}} - h_{\text{пв}})}, \quad (4.7)$$

где B – массовая производительность по ТКО, кг/ч; Q_i^r – теплота сгорания ТКО, кДж/кг; Q_i^d – теплота сгорания природного газа, кДж/нм³; B_{Γ} – расход газа, м³/ч; $Q_{\text{расп}}$ – тепло, вносимое в топку с перегретым паром на распыл карбамида, включая физическое тепло раствора карбамида, кДж/кг; $D_{\text{пр}}$ – расход воды на продувку, кг/ч; h' – энтальпия кипящей воды при давлении в барабане, кДж/кг; $h_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды на входе в котел-утилизатор, кДж/кг; $\sum Q_i$ – сумма тепловых потерь в котле, кДж/ч; $h_{\text{пе}}$ – энтальпия перегретого пара, кДж/кг.

$$Q_{\text{расп}} = m_{\text{п}}h_{\text{п}} + m_{\text{карб}}h_{\text{карб}}, \quad (4.8)$$

где $m_{\text{п}}$, $m_{\text{карб}}$ – расходы пара и раствора карбамида, кг/ч; $h_{\text{п}}$, $h_{\text{карб}}$ – энтальпии пара и карбамида, кДж/кг.

Расчет тепловых потерь котельной установки выполняется в соответствии с рекомендациями п. 4.2. Количество ЗШО, удаляемых из топки, из-под котла-утилизатора и уносимых дымовыми газами после котла-утилизатора, а также объемы газов принимаются по результатам материального баланса.

Физическое тепло, вносимое природным газом, пренебрежимо мало и поэтому не учитывается.

Расчет расхода пара на подогрев первичного и вторичного воздуха

Подогрев воздуха чаще всего производится насыщенным паром, отбираемым из барабана котла.

В этом случае расчет производится по балансовому уравнению:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{в}}((Ct)'' - (Ct)')}{(h'' - h_{\text{к}})}, \quad (4.9)$$

где $V_{\text{в}}$ – расход воздуха, м³/ч; Ct' , Ct'' – энтальпия воздуха на входе и на выходе из воздухоподогревателя, кДж/м³; h'' – энтальпия насыщенного пара, отбираемого из барабана, кДж/кг; $h_{\text{к}}$ – энтальпия конденсата на выходе из воздухоподогревателя, кДж/кг.

Расчет расхода воды на шлакоудалитель и количества испаренной влаги, направляемой в топку

Расчет выполняется на основе уравнения теплового баланса:

$$m_{\text{шл}}(C\vartheta)' + m_{\text{H}_2\text{O}}h_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{шл}}(C\vartheta)'' + m_{\text{H}_2\text{O}}'h_{\text{H}_2\text{O}}' + m_{\text{H}_2\text{O}}''h_{\text{H}_2\text{O}}'', \quad (4.10)$$

где $m_{\text{шл}}$ – расход сухого шлака на входе в шлакоудалитель, кг/ч; $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – расход воды на охлаждение шлака, кг/ч; $m_{\text{H}_2\text{O}}'$ – количество влаги, удаляемой из шлакоудалителя вместе с шлаком, кг/ч; $m_{\text{H}_2\text{O}}''$ – количество испаренной в шлакоудалителе влаги, кг/ч; $(C\vartheta)'$, $(C\vartheta)''$ – энтальпия сухого шлака на входе и на выходе из шлакоудалителя кДж/кг; $h_{\text{H}_2\text{O}}$ – энтальпия воды на входе в шлакоудалитель, кДж/кг; $h_{\text{H}_2\text{O}}'$ – энтальпия воды на выходе из шлакоудалителя, кДж/кг; $h_{\text{H}_2\text{O}}''$ – энтальпия влаги, испаренной в шлакоудалителе, кДж/кг.

Влажность шлака на выходе из шлакоудалителя принимается равной примерно 20%. С учетом указанного соотношения между массой шлака и влаги, удаляемой из шлакоудалителя, расчетная формула принимает вид:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{шл}} \left((C\vartheta)' - (C\vartheta)'' + \frac{h_{\text{H}_2\text{O}}'' - h_{\text{H}_2\text{O}}'}{4} \right)}{h_{\text{H}_2\text{O}}'' - h_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (4.11)$$

Температура шлака на входе в шлакоудалитель и воды в шлакоудалителе обычно принимают равными 400°C и 70°C соответственно.

Расчет расхода воды для снижения температуры дымовых газов на входе в рукавный фильтр.

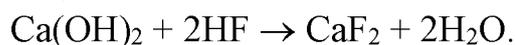
Дымовые газы с температурой выше 200°C и ниже 110°C могут вызывать повреждения ткани рукавного фильтра. Обычно температуру газов на входе в рукавный фильтр стараются поддерживать на уровне 130°C, которая является оптимальной с точки зрения связывания вредных веществ на поверхности рукавов. Для этого в поток дымовых газов впрыскивают холодную воду. Требуемый расход воды определяют из теплового баланса по уравнению:

$$m_{\Gamma} \cdot h^{190} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot h^{20} = (m_{\Gamma} + m_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot h^{130}, \quad (4.12)$$

где m_{Γ} , $m_{\text{H}_2\text{O}}$ – расход дымовых газов и воды на входе в газоочистку, кг/час; h^{190} , h^{130} – энтальпии дымовых газов на входе и на выходе из газоочистки, кДж/кг; h^{20} – энтальпия воды, кДж/кг.

Расчет массовых потоков на выходе из системы газоочистки

В расчете учитываются следующие химические реакции:



Количество загрязняющих веществ, принявших участие в химических реакциях, и распределение твердых продуктов реакций по потокам определяются коэффициентами эффективности улавливания, выбираемыми, исходя из принятых концентраций вредных веществ на выходе из системы газоочистки.

4.3.2. Принимаемые допущения

При расчетах принимаются следующие допущения:

- избыток воздуха в топке для $Q_{\Gamma} = 2\,000$ ккал/кг (8 380 кДж/кг) и выше принимается равным – 1,55; для $Q_{\Gamma} = 1\,300$ ккал/кг (5 450 кДж/кг) и ниже – равным 1,8; в диапазоне 1 300–2 000 ккал/кг (5 450–8 380 кДж/кг) – экстраполированием;
- доля вторичного воздуха принимается равной приблизительно 26%;
- присосы воздуха в котле, топке и системе газоочистки не учитываются;
- физическое тепло, вносимое в топку с ТКО, воздухом и природным газом, не учитывается;
- провал из-под решетки, который составляет менее 0,2% от расхода ТКО, в расчетах не учитывается;
- воздух состоит из азота N_2 – 79% и кислорода O_2 – 21%;
- соединения серы, хлора, и фтора, не переходящие в газовую фазу, содержатся в золе и шлаке в виде солей кальция и переходят в летучую золу и шлак пропорционально их массовому соотношению;
- связывание HCl , HF , SO_2 в котле происходит в соответствии с расчетами термодинамического состояния;

- коэффициент эффективности связывания «кислых» газов (коэффициент использования $\text{Ca}(\text{OH})_2$) принимается равным 0,4. В удаляемых продуктах газоочистки реакций с образованием CaCO_3 не происходит;
- коэффициент улавливания рукавного фильтра составляет 99,95%;
- воздух, подаваемый в нижнюю часть рукавного фильтра для создания кипящего слоя, а также для регенерации рукавов, ввиду малых расходов не учитывается.

4.3.3. Результаты балансовых расчетов

Результаты балансовых расчетов представляются в табличной форме. В качестве примера в табл. 4.1 показаны результаты расчета материального и теплового баланса одной технологической линии, изображенной на рис. 2.11, производительностью 180 тыс. тонн ТКО в год.

Видно, что при заданных характеристиках ТКО расход пара на турбину составляет 50÷60 т/ч. Для сжигания ТКО с теплотой сгорания $Q_i^r = 5\,450$ кДж/кг потребуется дополнительно сжигать примерно 1 266 $\text{м}^3/\text{ч}$ природного газа.

Таблица 4.1

Результаты расчета материального и теплового баланса одной технологической линии производительностью 180 тыс. тонн ТКО в год

Показатель	В номинальном режиме		В режиме максимальной нагрузке	
Q_i^r , кДж/кг	8 380	5 450	8 380	5 450
Производительность по ТКО, т/ч	21	21	26,00	24,46
Шлак (20 % влажности), т/ч	6,4	6,5	8,0	7,5
Зола котла, кг/ч	179	179	222	208
Продукты газоочистки, кг/ч	694	653	859	763
Расход воздуха общий, $\text{м}^3/\text{ч}$, в т.ч.	84 225	94 581	101 135	106 851
– первичный	52 764	52 567	65 326	61 213
– вторичный	18 261	18 193	22 609	21 185
Расход дымовых газов, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$	104,5	112,3	125,9	127,6
Расход $\text{Ca}(\text{OH})_2$, кг/ч	271	176	336	207
Расход активированного угля, кг/ч	11,5	12,4	13,9	14
Расход перегретого пара, т/ч	49,5	49,3	61,3	54,8
Расход питательной воды, т/ч	54,1	55	68,0	61,4
Расход природного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$	0	1 265	0	1 266
Расход воды на газоочистку, т/ч	3,7	4,0	4,5	4,5

Для обеспечения нормативных концентраций регламентируемых вредных веществ в дымовых газах, приведенных в табл. 5.2, потребуется 170–340 кг/ч $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и 12–14 кг/ч активированного угля.

4.4. Варианты энергетической утилизации генерируемого в процессе термической переработки ТКО пара

Варианты использования энергопотенциала ТКО на предприятиях для термической переработки отходов очень разнообразны: от чистого получения электричества или тепловой энергии до их совместной выработки.

В свою очередь, выбор схемы конденсационной ТЭС на ТКО обусловлен повышением эффективности преобразования тепловой энергии пара, генерируемого в котле, в электроэнергию. Рассмотрим три основных варианта утилизации пара на таких ТЭС: пар направляется непосредственно в турбину (автономная ТЭС на ТКО); работа установок для сжигания ТКО в составе традиционной ТЭС на органическом топливе с подачей пара на ступени среднего давления энергетической турбины; то же, но с подачей пара для дальнейшего перегрева в энергетический котел.

На рисунке 4.6 показана схема пароводяного тракта ТЭС на ТКО, работающей автономно, с котлом, изображенным на рис. 4.3.

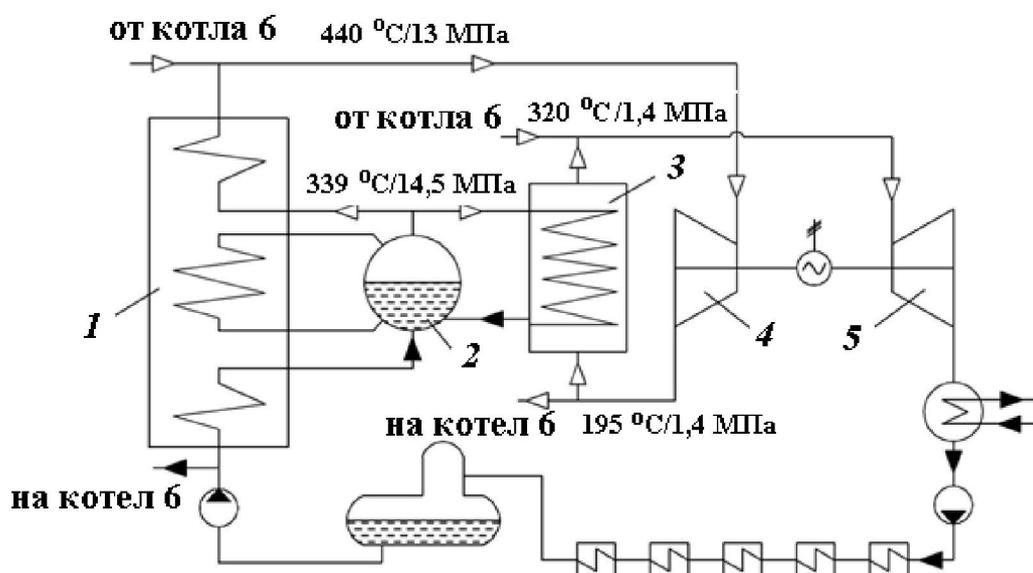


Рис. 4.6. Схема пароводяного тракта на предприятии для сжигания ТКО в г. Амстердам (ТЛ 5 и 6 завода Afval Energie Bedrijf):

1 – котел; 2 – барабан котла; 3 – теплообменник для промпрегрева пара;
4 – ступень турбины высокого давления; 5 – ступень турбины низкого давления

На такой ТЭС добиться высокого электрического КПД возможно не только за счет повышения параметров пара и организации промежуточного его перегрева, как показано на рис. 4.6, но и благодаря уменьшению температуры уходящих газов, снижению давления пара в конденсаторе и организации сжигания ТКО с относительно небольшими избытками воздуха – 1,5–1,6 (обычно 1,9–2,0). На ТЛ 5 и 6 завода Afval Energie Bedrijf удалось достичь практически предельного для ТЭС на ТКО электрического КПД на уровне 30%.

Дальнейшее увеличение электрического КПД достигается путем реализации принципа совмещения: часть котлов на традиционной электростанции сжигает органическое топливо, а часть – ТКО.

На рисунке 4.7 изображена тепловая схема ТЭС в г. Швайнфурте (Германия), на территории которой располагаются установки для термической переработки отходов.

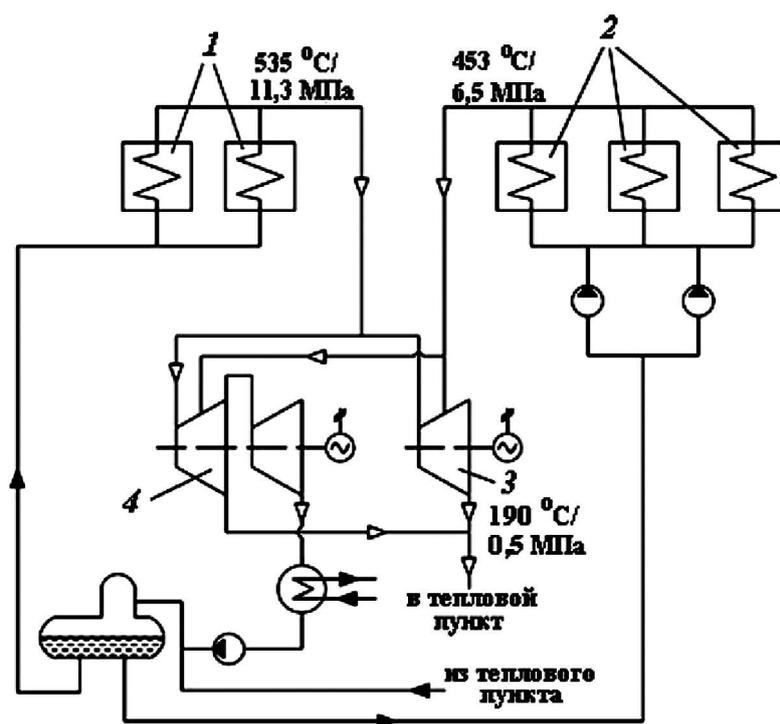


Рис. 4.7. Принципиальная тепловая схема ТЭС в г. Швайнфурте (Бавария):

- 1 – угольные котлы; 2 – котлы для сжигания ТКО; 3 – турбина с противодавлением;
4 – турбина теплофикационная с регулируемым отбором пара

В состав ТЭС, которая ежегодно термически перерабатывает более 170 тыс. т ТКО и обеспечивает теплом почти 1,1 млн чел., входят:

- два угольных котла (1) тепловой мощностью 63 МВт каждый, на которых вырабатывается 70 т/ч пара с давлением 11,3 МПа и температурой 535°C;

- три котла для сжигания ТКО (2) тепловой мощностью 21,2 МВт и паропроизводительностью 25 т/ч каждый;

- две турбины: с противодавлением (3) мощностью 12 МВт и теплофикационная с регулируемым отбором пара (4) мощностью 17 МВт.

Пар в котлах для сжигания ТКО вырабатывается с параметрами 6,5 МПа и 453°C и подается на ступени среднего давления турбин.

Путем интеграции котла для сжигания ТКО в тепловую схему энергетической ТЭС можно осуществить внешний дополнительный перегрев генерируемого в нем пара до высоких параметров. Чаще всего такой способ применяют на электростанциях с парогазовыми установками (ПГУ). В этом случае пар низких параметров (255–350°C) из котла, сжигающего отходы, смешивают со слабоперегретым паром котла-утилизатора (КУ), установленного на выхлопе газовой турбины, и подвергают в этом же КУ дальнейшему перегреву до 460°C и выше. Таким образом, появляется возможность использовать турбину на более высокие начальные параметры пара, что приводит к усовершенствованию всего паросилового цикла и в конечном итоге значительно повышает эффективность преобразования энергopotенциала ТКО в электроэнергию.

На рисунке 4.8 показана схема комбинированного парогазового цикла на ТЭС в г. Линчепинге (Швеция), на которой сжигают около 230 тыс. т ТКО в год.

Еще одним примером такой интеграции является предприятие для термической переработки ТКО в г. Vantaa (Финляндия), введенное в эксплуатацию в 2014 г. Ежегодно там на двух ТЛ сжигают 320 тыс. ТКО. Тепловая схема завода показана на рис. 4.9.

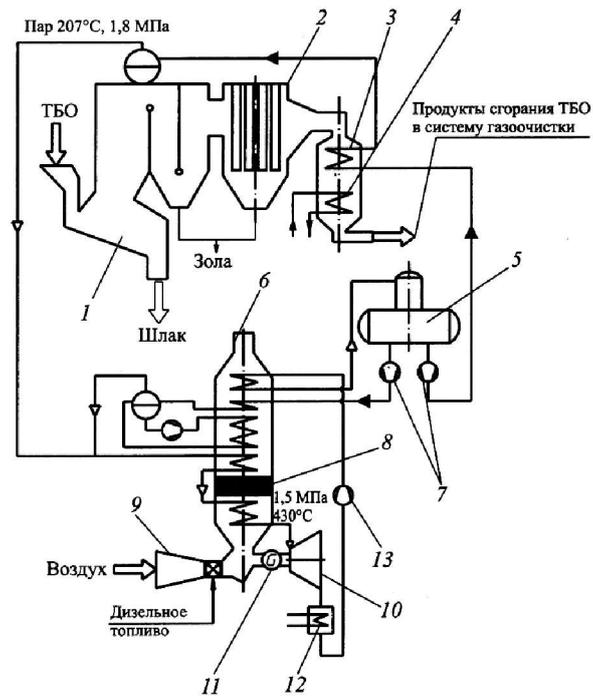


Рис. 4.8. Схема комбинированного парогазового цикла на ТЭС, сжигающей ТКО в г. Линчепинге (Швеция):

1 – котел для сжигания ТКО, 2 – электрофильтр, 3 – экономайзер, 4 – подогреватель сетевой воды, 5 – деаэратор, 6 – котел-утилизатор ПГУ, 7 – питательные насосы, 8 – система каталитического восстановления оксидов азота, 9 – газотурбинная установка, 10 – паротурбинная установка, 11 – электрогенератор, 12 – конденсатор, 13 – конденсатный насос

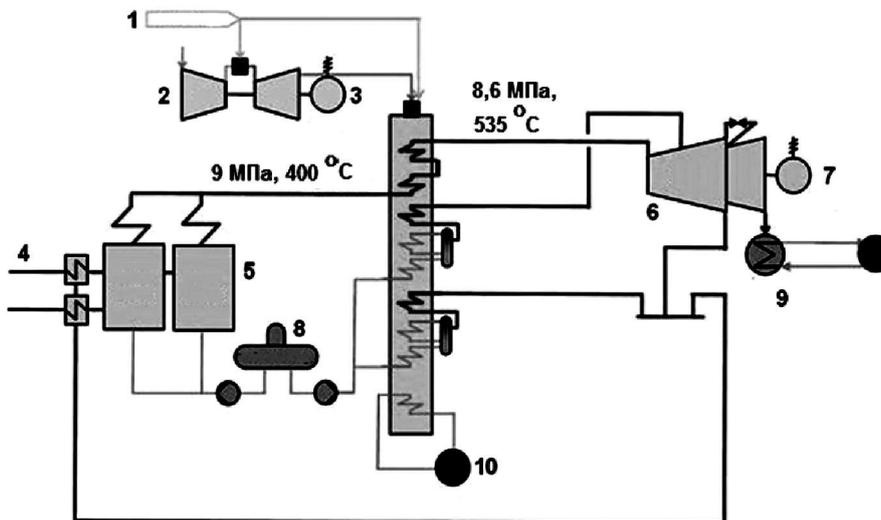


Рис. 4.9. Тепловая схема ТЭС в г. Vantaa (Финляндия):

1 – природный газ; 2 – газовая турбина; 3 – электрогенератор мощностью 31 МВт; 4 – воздухоподогреватели; 5 – установки WTE; 6 – паровая турбина; 7 – электрогенератор мощностью 49,5 МВт; 8 – деаэратор; 9 – система теплоснабжения (тепловая мощность 119,3 МВт); 10 – сетевой подогреватель

Генерируемый в котлах WTE пар с давлением 9,0 МПа и температурой 400°C поступает в котел-утилизатор ПГУ, перегревается до 535°C и направляется в паровую турбину мощностью 50 МВт_{эл}. Греющей средой в трехконтурном КУ служат продукты сгорания природного газа после газовой турбины мощностью 31 МВт_{эл}. В паровую турбину из КУ поступает также пар среднего давления ($P = 3,2$ МПа; $t = 370^\circ\text{C}$) и основной поток пара низкого давления ($P = 0,6$ МПа; $t = 157^\circ\text{C}$). Часть пара низкого давления направляется в паровые калориферы для нагрева дутьевого воздуха котлов WTE.

После турбины пар поступает в сетевой подогреватель для отпуска потребителю до 120 МВт тепловой энергии. Коэффициент использования тепла топлива ТЭС Vantaa приближается к 100%.

В [22] сообщается о других примерах совместной работы WTE и ПГУ: на ТЭС Моердийке (Нидерланды), Бильбао (Испания), а также на ряде заводов в Японии.

Иногда в составе одного предприятия пар от одних ТЛ направляется на расположенную рядом энергетическую ТЭС, а другие ТЛ работают автономно. Примером может служить завод в Майнце (Германия) производительностью 340,0 тыс. т ТКО в год (первые две ТЛ были пущены в 2003 г., а третья – в 2008 г.). Пар с параметрами 4,23 МПа и 400°C, генерируемый в ТЛ 1, 2, направляется на близлежащую ТЭС с ПГУ мощностью 400 МВт_{эл}, где перегревается до 550°C. Пар ТЛ 3 (4,23 МПа, 420 °C) поступает в собственную конденсационную турбину мощностью 20 МВт_{эл}, где преобразуется в электрическую энергию с достаточно высоким КПД – 27%. (Но все же наибольшая энергоэффективность достигается на ТЛ 1,2).

В заключение следует отметить, что выбор тепловой схемы для энергетической утилизации ТКО определяется технической возможностью (местными условиями) и экономической целесообразностью: насколько повышение доходов от продажи энергии компенсирует дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты и в конечном итоге скажется на себестоимости термической переработки ТКО.

4.5. Оценка энергоэффективности ТЭС на ТКО

В ЕС термическую переработку ТКО с преобразованием их энергопотенциала в тепловую и электрическую энергию приравнивают к утилизации только в том случае, если энергоэффективность (\mathcal{E}) предприятия, на котором энергопотенциал ТКО преобразуется в тепловую и электрическую энергию, составляет не менее 0,65 [2].

Энергоэффективность в соответствии с [2] рассчитывается следующим образом:

$$\Theta = \frac{(E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 \cdot (E_w + E_i))}, \quad (4.13)$$

где E_p – энергия, отпущенная потребителю в виде тепла или электроэнергии, ГДж/год. Эта величина умножается на коэффициент 1,1 при отпуске тепла и на 2,6 при выработке электроэнергии; E_f – теплота дополнительного топлива, затраченного на производство энергии, ГДж/год; E_w – энергия, содержащаяся в перерабатываемых отходах, рассчитанная с учетом их теплоты сгорания, ГДж/год; E_i – импортируемая энергии, получаемая от внешнего поставщика, ГДж/год, исключая E_w и E_f ; 0,97 – показатель для расчета тепловых потерь с ЗШО и в окружающую среду.

Анализ формулы (4.13) показывает, что на энергоэффективность, в первую очередь, влияют объем отпускаемой потребителю энергии, количество перерабатываемых отходов, их теплота сгорания, а также расход дополнительного топлива (дополнительных источников энергии), которые необходимы для протекания процесса. Понятно, что, как и для любой электростанции, на количество отпускаемой потребителю энергии влияют собственные нужды, которые зависят от технологии термической переработки и мощности предприятия.

Теплота сгорания образующихся в настоящее время ТКО достаточно высока (7–8 МДж/кг для отходов крупных городов России и 10–12 МДж/кг для европейских отходов). Опыт эксплуатации существующих ТЭС на ТКО показывает, что при сжигании таких высококалорийных отходов дополнительное топливо используется только в пуско-остановочных режимах (т.е. членом E_f в формуле (4.13) можно пренебречь). Затраты на собственные нужды покрываются за счет сжигания отходов, т.е. импорт энергии от внешнего поставщика отсутствует.

Тогда формулу (4.13) можно преобразовать в следующий вид:

$$\Theta = \frac{\left[\left(1 - \frac{E_{сн}}{Q_i^r \cdot \eta_{эл} \cdot B_p} \right) \cdot 2,6 \cdot \eta_{эл} + \frac{B_r}{B_p} \cdot (1,1 \cdot \eta_{теп} - 2,6 \cdot \eta_{эл}) \right]}{0,97}, \quad (4.14)$$

где $E_{сн}$ – электроэнергия, затраченная на собственные нужды, ГДж/год; B_p – расход перерабатываемых отходов, т/год; Q_i^r – теплота сгорания перерабатываемых отходов, МДж/кг; $\eta_{эл}$, $\eta_{теп}$ – коэффициенты преобразо-

вания энергопотенциала отходов в электрическую и тепловую энергию (электрический и тепловой КПД) соответственно; B_T – количество отходов, которые сжигают для отпуска потребителю только тепловой энергии, т/год.

Предлагаемое в формуле (4.14) разделение отходов для производства только электроэнергии и только тепла (введение B_T), – условное. Понятно, что в случае комбинированной выработки электрической и тепловой энергии удельные расходы топлива рассчитываются по специальным методикам. Однако для оценки нижнего предела энергоэффективности для ТЭС, сжигающей ТКО, данный подход существенно упрощает задачу.

Из формулы (4.14) видно, что на энергоэффективность оказывают влияние электрический и тепловой КПД, расход и теплота сгорания отходов, энергия, затраченная на собственные нужды предприятия. Но ключевым фактором является количество (доля) отпускаемой потребителю тепловой энергии.

Оценим энергоэффективность для ТЭС на ТКО производительностью 360 тыс. т ТКО в год, которая для России наиболее масштабируема и приспособлена к сжиганию отечественных отходов, а доля локализации (возможность изготовления оборудования на отечественных предприятиях) от стоимости всего объекта может достигать 82 % [10].

Если принять реально достижимый на сегодняшний момент для таких ТЭС коэффициент преобразования энергопотенциала отходов в тепло (тепловой КПД) равным 0,85, а собственные нужды – на уровне 4 МВт (30 000 МВт·ч), то можно построить зависимости $\mathcal{E} = f(B_T/B_p)$ для разных $\eta_{эл}$ (рис. 4.10) и Q'_r (рис. 4.11).

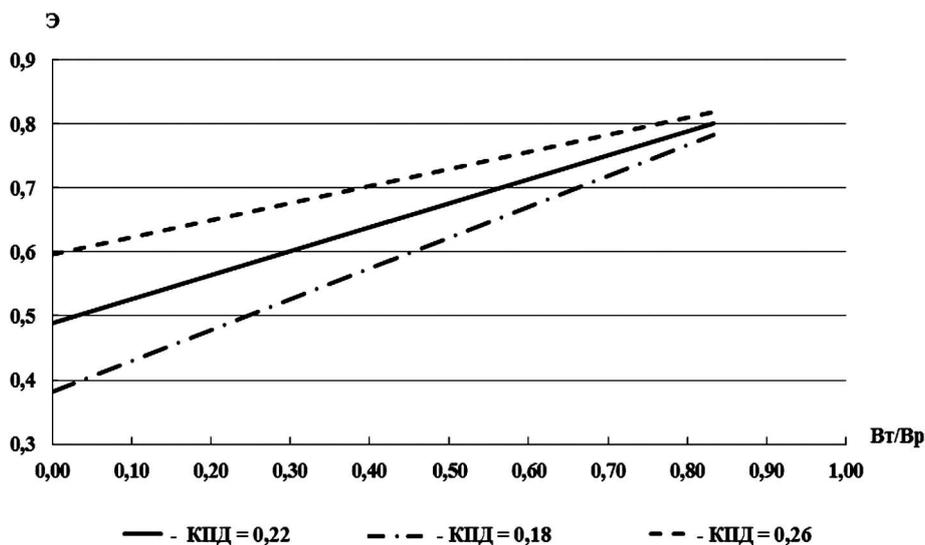


Рис. 4.10. Влияние электрического КПД и удельной доли отпускаемой тепловой энергии (условного количества отходов, затрачиваемых на отпускаемое потребителю тепло) на энергоэффективность ТЭС, сжигающей 360,0 тыс. т ТКО в год с $Q'_r = 8$ МДж/кг

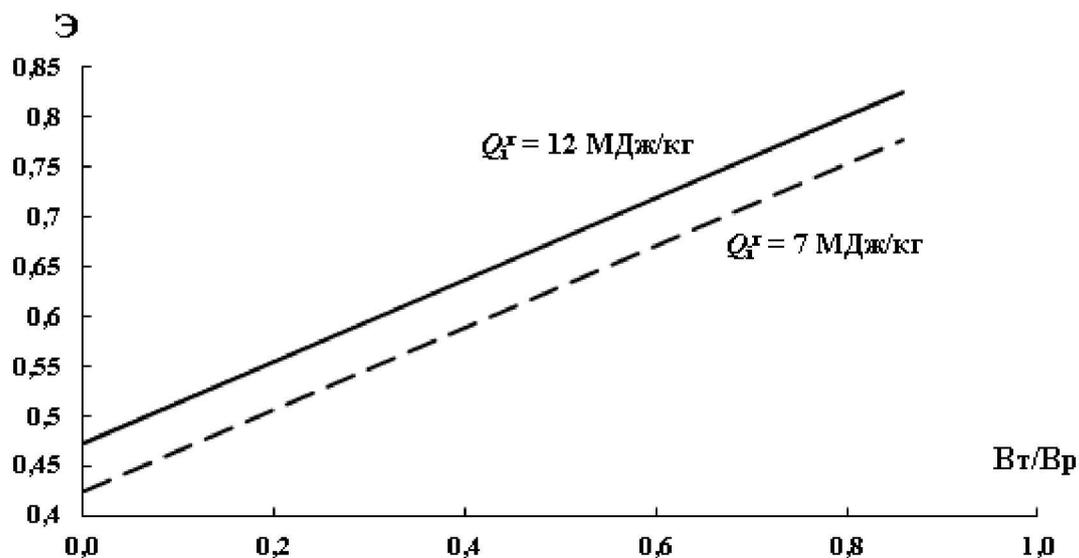


Рис. 4.11. Влияние теплоты сгорания отходов и удельной доли отпускаемой тепловой энергии (условного количества отходов, затрачиваемых на отпускаемое потребителю тепло) на энергоэффективность ТЭС производительностью 360,0 тыс. т ТКО в год с коэффициентом преобразования энергопотенциала отходов в электрическую энергию $\eta_{эл} = 0,2$

На рисунке 4.12 показана зависимость $\mathcal{E} = f(\eta_{эл})$ при работе ТЭС на ТКО в конденсационном режиме для разной теплоты сгорания отходов.

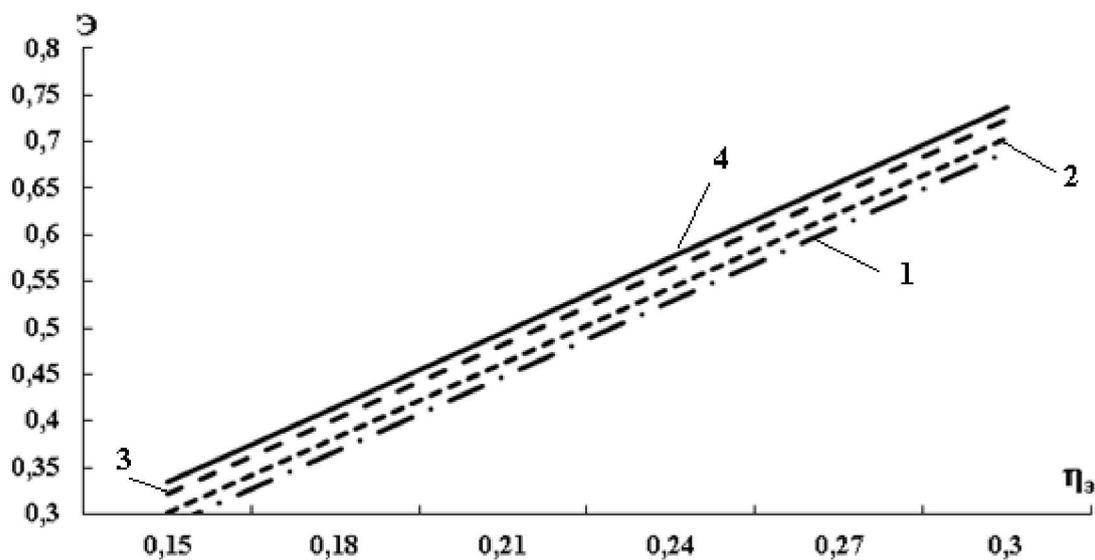


Рис. 4.12. Влияние электрического КПД на энергоэффективность ТЭС, сжигающей 360,0 тыс. т ТКО в год:

1 – $Q_r = 7 \text{ МДж/кг}$; 2 – $Q_r = 8 \text{ МДж/кг}$; 3 – $Q_r = 10 \text{ МДж/кг}$; 4 – $Q_r = 12 \text{ МДж/кг}$

Анализ рис. 4.12 показывает, что при сжигании российских отходов с теплотой сгорания 8 МДж/кг, установленный Директивой ЕС [2] нижний предел энергоэффективности может достигаться лишь в том случае, если коэффициент преобразования энергопотенциала отходов в электрическую энергию (электрический КПД) будет более 27%. Такой высокий электрический КПД в настоящее время имеют только лучшие мировые образцы WTE, например, ТЛ 5 и 6 завода Afval Energie Bedrijf в Амстердаме, описание которого приведено в р.4.4.

Россия только приступает к освоению ВИЭ на базе ТЭС на ТКО. Отечественный опыт термической переработки ТКО с выработкой электроэнергии весьма ограничен. В нашей стране построено только три предприятия, на которых энергопотенциал ТКО преобразуется в электроэнергию. Это введенный в 2001 г. после реконструкции московский СЗ №2, на котором установлены три турбоагрегата электрической мощностью 1,2 МВт каждый, московский СЗ № 4 (год пуска 2005 г., установленная электрическая мощность 12 МВт) и московский СЗ № 3 (введен в эксплуатацию в 2007 г., установленная электрическая мощность 11 МВт).

Электрический КПД на СЗ №2 и №4 из-за низких параметров пара не превышает 15%. Отпуск тепла внешнему потребителю отсутствует. Энергоэффективность СЗ №3 за счет возможности отдавать тепло в сеть и применения турбины с противодавлением, чуть выше, но все равно ниже европейских аналогов.

Вряд ли можно ожидать, что головные образцы отечественных предприятий для энергетической утилизации ТКО будут иметь энергоэффективность выше 0,65. Это, как показано ранее, подразумевает их работу только в теплофикационном режиме с гарантированным отпуском тепла потребителю, что весьма проблематично в России в настоящее время. Скорее всего, в большинстве случаев это будут конденсационные ТЭС с $\eta_{эл} = 0,2$, на которых будут сжигать ТКО с $Q_i' = 7-9$ МДж/кг. Энергоэффективность таких ТЭС на ТКО не превысит 0,45. Именно поэтому на данном этапе развития для российских установок, предназначенных для энергетической утилизации ТКО, значение энергоэффективности на уровне 0,45 вполне обосновано. В дальнейшем по результатам опытной эксплуатации головных ТЭС на ТКО этот показатель может быть скорректирована в сторону увеличения, а в пределе может даже сравняться с принятой в ЕС величиной.

4.6. Пути повышения энергоэффективности ТЭС на ТКО

Энергоэффективность ТЭС на ТКО существенно зависит от ее мощности, а также от количества ТЛ, входящих в ее состав.

Считается, что WTE должны иметь мощность более 100,0 тыс. ТКО в год и сжигать отходы с теплотой сгорания более 7 МДж/кг. Только тогда их создание и эксплуатация будет экономически целесообразна. Приемлемая энергоэффективность достигается на заводах производительностью более 260 тыс. т ТКО.

Понятно, что наименьшие капитальные и эксплуатационные затраты будут у завода с одной ТЛ, а обеспечивают надежную работу и, соответственно, позволяют избежать штрафных санкций из-за срыва приема ТКО – заводы с двумя и более ТЛ.

Анализ существующих заводов производительностью более 260 тыс. т ТКО, на которых установлены решетки ведущих фирм-производителей (Martin GmbH, Hitachi Zosen Inova (Von Roll), Babcock&Wilcox Vound A/S, Fisia Babcock Environment GmbH (Steinmuller) и Lentjes (Doosan)), построенных после 2000 г., показывает, что в основном на этих заводах установлены две (55%) или три (26%) технологические линии (рис. 4.13).

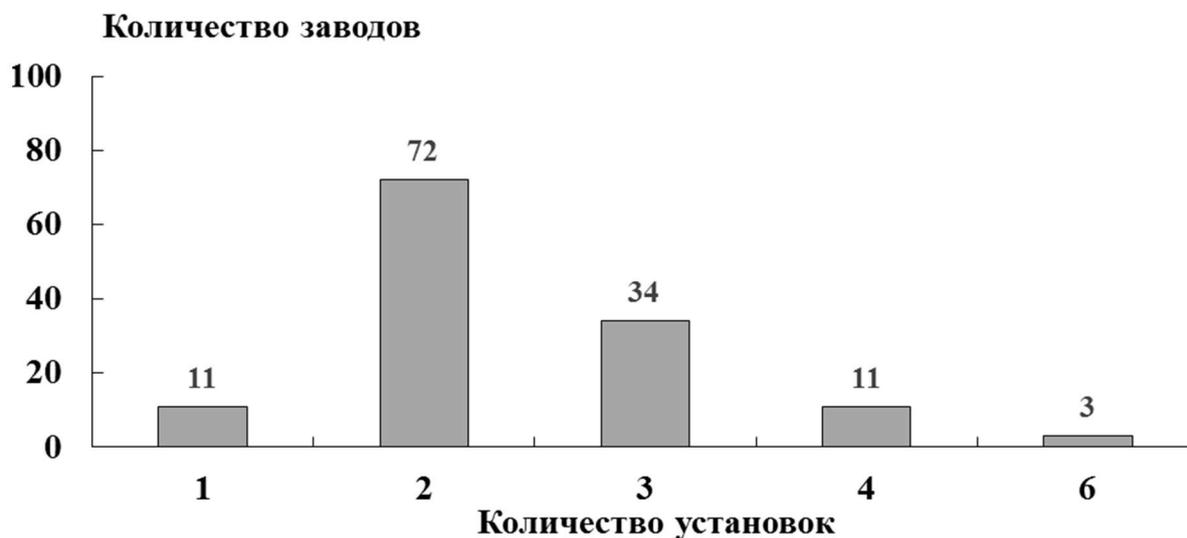


Рис. 4.13. Заводы производительностью более 260 тыс. т ТКО в год, запущенные в эксплуатацию после 2000 г., имеющие в своем составе одну, две, три, четыре и шесть ТЛ

Средняя производительность решеток, применяемых на таких заводах составляет примерно 25 т/ч. Наибольшее количество ТЛ (примерно 49%) имеет производительность от 20 до 30 т/ч (рис. 4.14).

В состав заводов производительностью 260–300 тыс. т ТКО в год входят в основном две или три ТЛ (рис. 4.15). Для заводов производительностью 300–400 тыс. т в год, как правило, применяют две технологические линии, а для предприятия более 400 тыс. т ТКО в год могут использоваться как две, так и три, и более ТЛ.

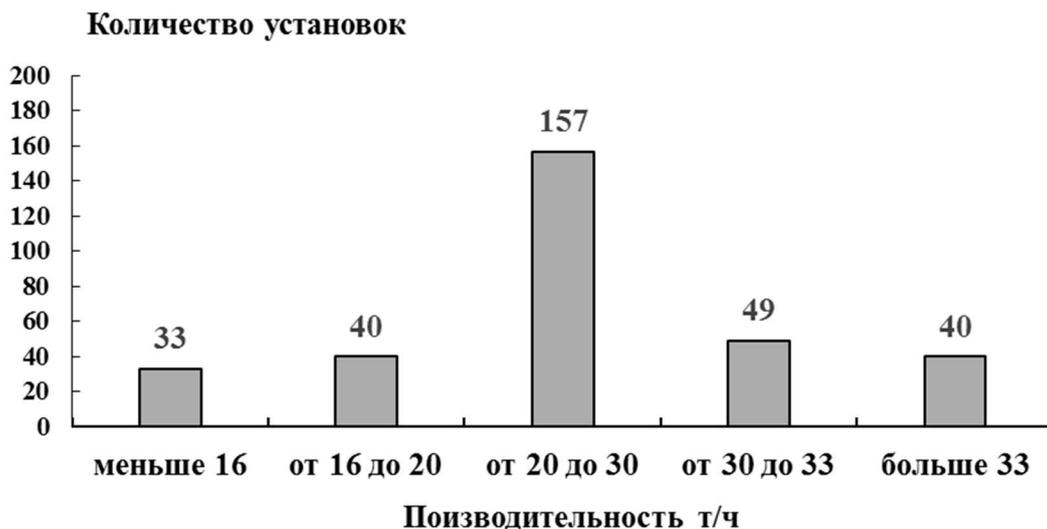


Рис. 4.14. Производительность ТЛ на заводах, перерабатывающих более 260 тыс. т ТКО в год (введенные в эксплуатацию после 2000 г.)

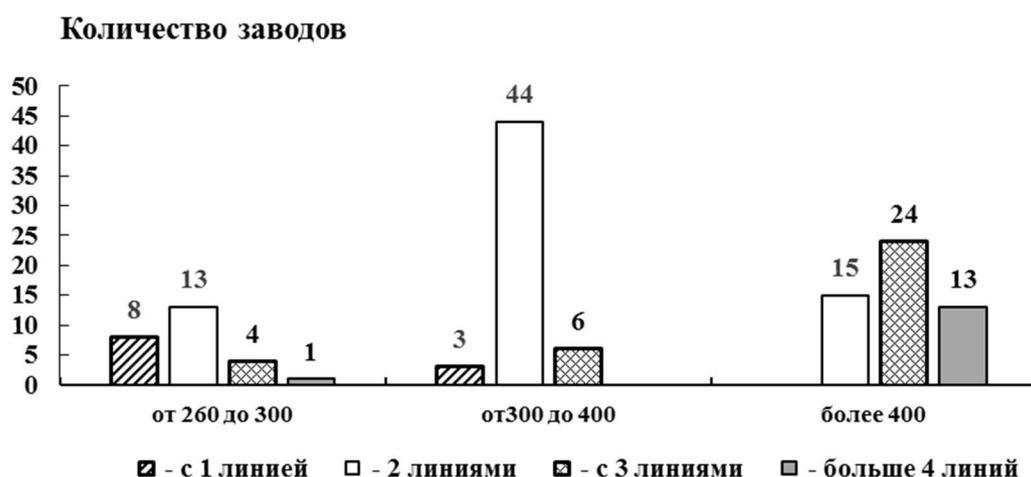


Рис. 4.15. Количество ТЛ в зависимости от производительности завода

Данные обстоятельства особенно следует учитывать при проектировании ТЭС на ТКО, работающей автономно. Например, наиболее оптимальным решением для ТЭС производительностью 360 тыс. т ТКО в год является две ТЛ производительностью 20–25 т/ч.

Как уже говорилось, увеличить электрический КПД установок для энергетической утилизации ТКО можно за счет повышения параметров пара, организацией промежуточного перегрева пара, снижением температуры уходящих газов, уменьшением давления пара в конденсаторе, улучшением процесса горения, оптимизацией тепловой схемы. В свою очередь, повысить параметры пара возможно путем применения коррозионно-стойких сталей и защитных покрытий, а также перегрева пара на вынесенных из котла теплообменных поверхностях, обогреваемых продуктами сгорания органического топлива.

Ну и, конечно же, работа ТЭС на ТКО в режиме комбинированного отпуска потребителю тепла и электроэнергии существенно повышает энергоэффективность.

Зарубежный опыт показывает, что в результате реализации этих мероприятий удастся достичь высоких значений энергоэффективности, на некоторых ТЭС – 100% и более.

Завод WTE Brescia (Италия) с ОПКР Martin перерабатывает 800,0 тыс. т ТКО в год. Пар с параметрами 7,2 МПа и 450 °С поступает в турбоагрегат мощностью 100 МВт_{эл}. Электрический КПД – более 27%; годовой отпуск электрической и тепловой энергии составляет 570 МВт-ч и 568 МВт-ч соответственно [10]. Коэффициент использования тепла топлива на WTE Brescia составляет на уровне 65%.

Завод WTE SILLA 2 в Милане, производительностью более 500 тыс. т ТКО в год, успешно работает с 2001 г. и обеспечивает теплом почти одну треть города. В состав завода входят три ТЛ с ОПКР системы Martin, производительностью 26 т/ч каждая. Работа в теплофикационном цикле и высокие параметры пара (5,2 МПа, 425 °С) обеспечивают высокую энергоэффективность завода. Зимой при отпуске потребителю электрической и тепловой энергии с мощностью 30,2 МВт_{эл} и 140 МВт_{теп} соответственно, энергоэффективность составляет около 108%. Летом при работе завода в конденсационном режиме мощность турбогенератора достигает 63 МВт_{эл}. В среднем по году энергоэффективность WTE SILLA 2 находится на уровне 84%.

Самый большой в Швейцарии завод Хагенхольц после модернизации в 2010 г. имеет мощность по сжиганию примерно 240 тыс. ТКО в год и является лидером в области энергетического использования ТКО в этой стране (энергоэффективность составляет 0,92). На заводе установлено две ТЛ, номинальной производительностью 115,0 тыс. т ТКО в год каждая. Генериру-

емый пар с давлением 40 бар и температурой 400°C преобразуется в полезную энергию с отпуском электричества в сеть г. Цюриха, а также в виде пара и горячей воды в централизованное теплоснабжение северной части Цюриха (Цюрих-Норд). В 2013 г. завод по сжиганию отходов в Хагенхольце произвел около 121 000 МВт·ч электроэнергии и 638 000 МВт·ч тепла. За вычетом собственного потребления в городские сети направлено около 97 000 МВт·ч электроэнергии и 404 000 МВт·ч тепла.

Таким образом, в мире накоплен достаточно большой опыт по повышению энергоэффективности ТЭС на ТКО. Целесообразность внедрения тех или иных мероприятий на конкретных установках определяется на основании технико-экономических оценок и местных условий.

Поиск путей повышения энергоэффективности ТЭС на ТКО стал приоритетным направлением исследований в области термической переработки ТКО после того, как была решена проблема с обеспечением экологической безопасности эксплуатации таких предприятий. Это стало возможным после того, как все сжигательные установки были оснащены современным оборудованием для очистки дымовых газов.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем специфика котлов для сжигания ТКО? Что влияет на конфигурацию этих котлов?

2. Что составляет основу метода определения тепловой эффективности котлов для сжигания ТКО? Назовите основные виды тепловых потерь для таких котлов.

3. Опишите алгоритм расчета материального баланса процесса термической переработки ТКО.

4. Назовите среднее значение электрического КПД энергоустановок современных ТЭС на ТКО и основные пути его повышения.

5. В чем преимущества совместной работы установок для энергетической утилизации ТКО и традиционной ТЭС, сжигающей органическое топливо?

6. Опишите процесс получения электроэнергии на ТЭС, в состав которой входят установки для сжигания ТКО и ПГУ.

7. Как рассчитывается энергоэффективность ТЭС на ТКО? Какое минимальное значение этой величины должно быть, чтобы процесс термической переработки отходов на такой ТЭС классифицировался как энергетическая утилизация?

8. Назовите основные пути повышения энергоэффективности ТЭС на ТКО.

5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ ТЭС, СЖИГАЮЩЕЙ ТКО, НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ. ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ТЭС ПРИРОДООХРАННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

5.1. Нормативные показатели и современные требования к очистке дымовых газов для установок, сжигающих ТКО

Защита атмосферного воздуха – одна из наиболее актуальных проблем при сжигании твердых коммунальных отходов, поскольку, как показывает мировой опыт, экологические ограничения иногда становятся определяющим препятствием на пути развития и расширения электростанций, использующих ТКО в качестве топлива.

В большинстве стран мира для ТЭС на ТКО также как, и для традиционных ТЭС, устанавливают специальные государственные нормативы по выбросам вредных веществ в атмосферу. При этом к предприятиям для термической переработки отходов предъявляются самые строгие экологические требования. Динамику ужесточения этих требований можно проследить на примере Германии по нижеприведенной табл. 5.1.

Таблица 5.1

Нормирование содержания вредных примесей в газообразных продуктах сгорания ТКО в Германии (мг/нм³)

Наименование	TA Luft 1974	TA Luft 1986	17 Bimsch V	
			от 12/1996	от 8/2003
Твердые частицы	100	30	10	10
Углерод С	—	20	10	10
Хлористый водород HCl	100	50	10	10
Фтористый водород HF	5	2	1	1
Оксиды серы SO ₂	—	100	50	50
Оксиды азота NO _x	—	500	200	200
Моноксид углерода CO	1000	100	50	50
Ртуть Hg	20 (без учета Tl, Se, Te, Co)	0,2	0,05	0,03
Кадмий Cd			0,05	0,05
Таллий Tl			—	—
Селен Se		1	—	—
Теллур Te			0,5	0,5
Никель Ni				
Кобальт Co				
Мышьяк As		5	0,5	0,5
Ванадий V				
Свинец Pb				
Хром Cr				
Медь Cu				

Наименование	TA Luft 1974	TA Luft 1986	17 Bimsch V	
			от 12/1996	от 8/2003
Марганец Mn	—	5	0,5	0,5
Олово Sn				
Сурьма Sb				
Железо Fe			—	—
Платина Pt				
Палладий Pd				
Родий Rh				
As, бензопирены, Cd, Co, Cr	—	—	—	0,05
ПХДД/ПХДФ, нг/нм ³ 1)	—	—	0,1	0,1

Примечание: 1) концентрация ПХДД/ПХДФ приводится в пересчете на эквивалент токсичности, который обычно указывается в ng TEQ/nm³ или ng ЭТ/нм³. В таблице и по тексту пособия для упрощения изложения размерность условно обозначается в нг/нм³

Установленные в России нормативные значения по содержанию вредных примесей в газообразных продуктах сгорания ТКО ориентированы на Директиву 2000/76/ЕС [13]. Их значения приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Нормативные выбросы загрязняющих веществ
с уходящими газами энергетических установок,
сжигающих ТКО и органическое твердое топливо (мг/нм³)**

Наименование	Энерготехнологические установки, сжигающие ТКО		Энергетические установки для сжигания твердых топлив 1)	
	средне-суточные	средне-получасовые	$\alpha = 1,4$	в пересчете на $\alpha = 2,0$
Твердые частицы	10	30	150–250 ²⁾	100–165
Моноксид углерода	50	100	300–400	200–260
Оксиды азота, NO _x	200	400	300–640 ³⁾	200–420
Оксиды серы, SO _x	50	200	1 200–1 400 ⁴⁾	800–920
Хлористый водород	10	60	не нормируется	не нормируется
Фтористый водород	1	4	не нормируется	не нормируется
Тяжелые металлы:	среднее по пробам		не нормируется	не нормируется
Ртуть, Hg	0,05			
Кадмий, талий, Cd, Tl	0,05			
Суммарно другие: (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	0,5			
ПХДД/ПХДФ	0,1 нг/нм ³		не нормируется	не нормируется

Примечание: Величины приведены для сухих газов, приведенных к стандартным условиям (температура – 273,15 К, давление – 101,3 кПа, концентрация O₂ – 11 %).

1) Для котлов с паропроизводительностью до 320 т/ч. 2) Большие значения для приведенного содержания золы A_{пр} более 2,5%·г/МДж, меньшие – для A_{пр} < 0,6%·г/МДж. 3) Меньшее значение для сжигания бурых углей, большее – для сжигания углей с жидким шлакоудалением. 4) Меньшее значение для приведенного содержания серы S_{пр} менее 0,045%·кг/МДж, большее – для S_{пр} > 0,045%·кг/МДж

Результаты измерений должны быть стандартизированы на нормальные условия (температура 0°С, давление 101,3 кПа) и рассчитаны на сухие газы при объемном содержании в них кислорода 11%. Следует отметить, что эти нормативы более жесткие, чем принятые в России для обычных электростанций, работающих на органическом топливе (см табл. 5.2). Для их достижения используют различные методы и технологии очистки газообразных продуктов сгорания ТКО, поскольку организовать одновременное снижение выбросов всех основных регламентируемых показателей вредных веществ в рамках какого-либо одного метода или на одной технологической стадии практически невозможно.

Проблема ограничения загрязнения атмосферного воздуха на современных установках, сжигающих ТКО, решается комплексно, путем внедрения нескольких природоохранных методов и мероприятий, реализуемых на разных стадиях технологического процесса.

Следует отметить, что стоимость оборудования газоочистки составляет значительную часть капитальных ТЭС на ТКО, и в некоторых случаях сопоставимы со стоимостью котла. Правильный выбор системы газоочистки позволяет снизить общую стоимость ТЭС.

5.2. Краткий обзор существующих методов и технологий очистки газообразных продуктов сгорания ТКО от вредных выбросов

На всех современных предприятиях, сжигающих ТКО, применяют систему очистки дымовых газов от золы, «кислых» газов, тяжелых металлов, оксидов азота, ПХДД/ПХДФ и других вредных составляющих.

5.2.1. Очистка дымовых газов от твердых частиц и «кислых» газов

Очистка дымовых газов от твердых частиц происходит в золоуловителях. В качестве золоуловителей практически на всех современных установках используют рукавные фильтры, которые способны очищать газы от твердых частиц на 99,9% и более. Для предварительной сепарации твердых частиц перед рукавным фильтром иногда устанавливают электрофильтр, центробежный циклон или другой тип инерционных золоуловителей.

Принципиальная конструкция рукавного фильтра представлена на рис. 5.1, на котором изображен рукавный фильтр фирмы Balcke-Dürr GmbH.

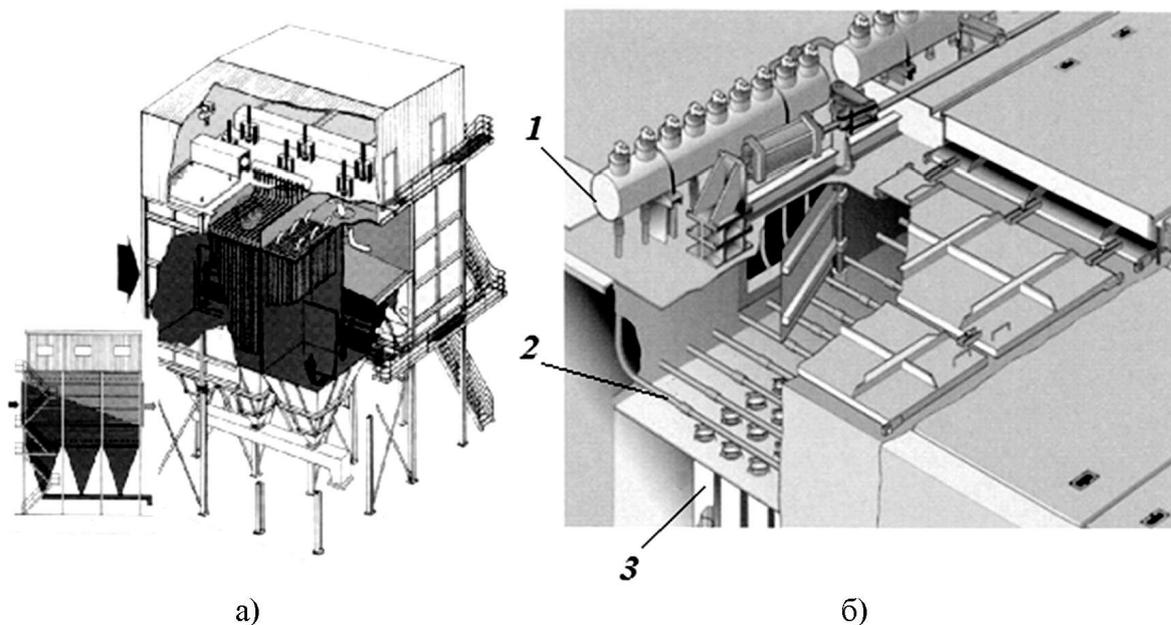


Рис. 5.1. Общий вид рукавного фильтра фирмы Walcke-Dürr GmbH:

а) внешний вид; б) система пневмоочистки рукавов; 1 – коллектор сжатого воздуха; 2 – воздухораспределительные трубки; 3 – рукав фильтра

Высокая степень улавливания рукавного фильтра обусловлена фильтрацией газа через слой твердых частиц, сформированных на поверхности рукавов. Химический состав этих частиц не влияет на эффективность работы аппарата, более того, при повышенных содержаниях в них свободных оксидов щелочных металлов (кальция, магния, калия) можно обеспечить улавливание и некоторого количества «кислых» газов – диоксида серы, хлористого и фтористого водорода.

Зарубежная практика свидетельствует о том, что гарантируемый срок службы ткани рукавов при температурах газов 150–170°C составляет 3–5 лет.

Эффективность пылеулавливания в электрофильтрах значительно меньше по сравнению с рукавным фильтром и находится на уровне 0,96–0,99. Однако работать электрофильтры могут при более высоких температурах – до 300–400°C. Следует отметить, что применение электрофильтров на предприятиях, сжигающих ТКО, в последнее время существенно сократилось, так как они не только имеют низкий КПД улавливания, но и могут способствовать образованию ПХДД/ПХДФ при прохождении через них высокотемпературных дымовых газов.

Сухая очистка дымовых газов

Сухие методы очистки дымовых газов от «кислых» вредных составляющих основаны на вдувании щелочных порошкообразных сорбентов, например, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или NaOH , и активированного угля в поток дымовых газов при их прохождении через соответствующий реактор.

На рисунке 5.2 представлена принципиальная схема очистки дымовых газов по этому методу, реализованная на установках энергетического центра в г. Штасфурте, на заводе в Зорбау (Германия) и на ряде других объектов.

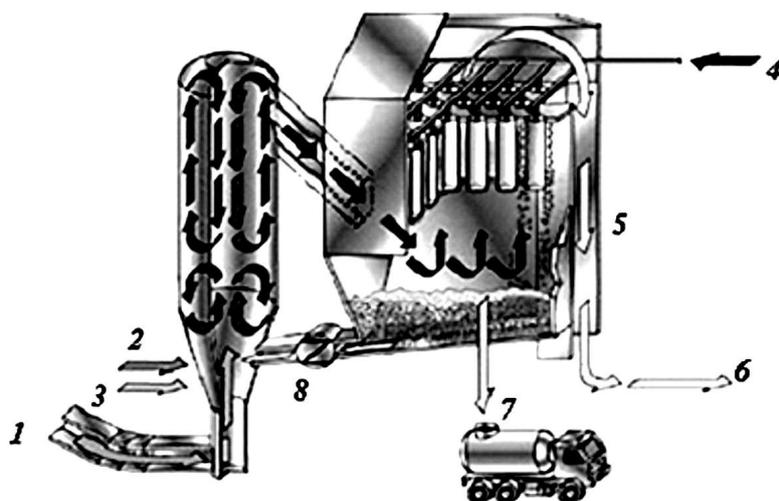


Рис. 5.2. Схема очистки продуктов сгорания ТКО на установках в г. Штасфурте и Зорбау:

- 1 – дымовые газы из котла; 2 – вода;
 3 – смесь гидроксида кальция и активированного угля;
 4 – сжатый воздух для пневмоочистки рукавов; 5 – рукавный фильтр;
 6 – дымовые газы к дымососу; 7 – выгрузка золы; 8 – рециркуляция золы

Дымовой газ поступает в реактор снизу по центру и двигается в турбулентном потоке с гидроксидом кальция и активированным углем к выпускному отверстию реактора, а затем направляется в рукавный фильтр. Для экономии реагентов большая часть уловленных твердых частиц из рукавного фильтра возвращается назад в реактор, где смешивается с дымовыми газами.

Химические реакции и процесс сорбции, происходящие в реакторе с добавлением гидроксида кальция и активированного угля, наиболее оптимально обеспечивают очистку дымовых газов при температурах около 130–140°C. Регулирование температуры дымовых газов осуществляется за счет впрыска воды.

На рисунке 5.3 приведена схема очистки дымовых газов по методу CDAS, реализованная на заводе по переработке отходов в г. Швандорфе.

Как и в предыдущем случае, дымовые газы подводятся в реактор по центру снизу через сопло Вентури. Основное отличие заключается в том, что место ввода реагентов и рециркулирующей золы, с одной стороны, и место впрыска воды, с другой стороны, разнесены на максимально возможное расстояние.

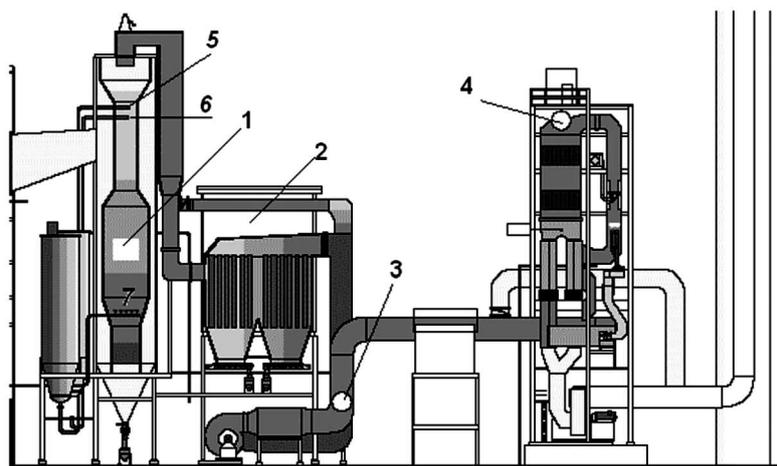


Рис. 5.3. Схема очистки дымовых газов в циркулирующем кипящем слое на установках завода по переработке отходов в г. Швандорфе:

- 1 – CDAS-реактор; 2 – рукавный фильтр; 3 – дымосос рециркуляции;
 4 – реактор СКВ; 5 – ввод рециркулирующей золы; 6 – ввод реагентов;
 7 – впрыск воды

Твердые частицы непрерывно выводятся из верхней части реактора и вместе с дымовыми газами поступают рукавный фильтр. Часть уловленных в нем твердых частиц возвращается в реактор. В результате такой рециркуляции время пребывания сорбентов в реакторе достигает 30 минут. Подобный метод сухой очистки был разработан и внедряется шведской фирмой «Флект» (ABB Flakt Industri AB).

Необходимо отметить, что в технологиях, использующих сухую сорбцию велик непроизводительный расход реагентов. К достоинствам этих схем относятся простота устройств при малой потребности в площади и невысокие капитальные затраты.

Полусухая очистка дымовых газов

Полусухой метод очистки дымовых газов основан на принципе распылительной сушилки. При этом методе реагенты впрыскиваются в дымовые газы в виде суспензии, например, суспензия извести. Капли суспензии извести реагируют с «кислыми» газами (HCl , HF , SO_x) с образованием соответствующих солей кальция, в то время, как водная составляющая суспензии испаряется, снижая тем самым температуру дымовых газов перед рукавным фильтром. Получающиеся в результате реакции вещества полностью высушиваются до образования порошкообразного остатка, который затем улавливается в золоуловителе. Полусухой метод очистки реализован на московских спецзаводах №2 и №4.

На рисунке 5.4 приведена схема полусухой очистки газов на СЗ №2.

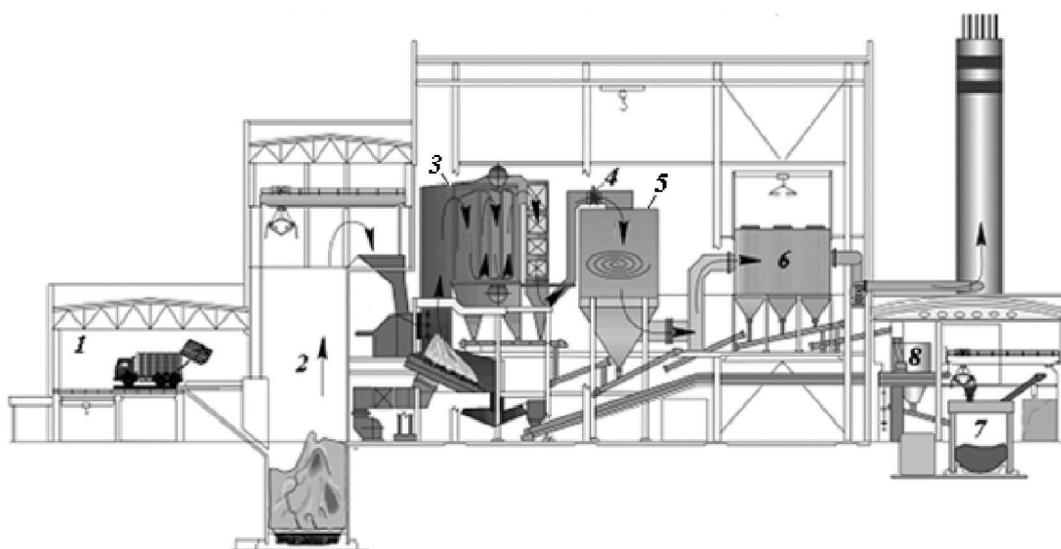


Рис. 5.4. Схема процесса термической утилизации ТКО на московском спецзаводе №2 (показана одна технологическая линия):

1 –отделение приема ТКО; 2 – приемный бункер; 3 – котел;
4 – узел подачи активированного угля; 5 – абсорбер; 6 – рукавный фильтр;
7 – бункер шлака; 8 – бункер золы

Дымовые газы после котла (3) поступают в абсорбер (5), в который в виде суспензии подают гидроксид кальция. Летучая зола, продукты химических реакций и непрореагировавшая известь в сухом виде улавливаются в рукавном фильтре и собираются в специальной емкости.

Температура газового потока на выходе из абсорбера поддерживается на уровне 140°C. Опыт работы СЗ №2 показал, что для надежной работы абсорбера важно обеспечить тонкий распыл подаваемой суспензии и хорошее перемешивание капель суспензии с дымовым газом.

В состав каждой из трех технологических линий СЗ №4 также входит абсорбер, который представляет собой полый аппарат циклонного типа диаметром 8,5 м и общей высотой 17,55 м с центральным вводом дымовых газов через закручивающее устройство. Диаметр патрубка для ввода дымовых газов – 1,6 м.

Распылительная машина установлена по оси абсорбера в месте ввода газов и работает в условиях свободного слива реагента на рабочий диск. Механизм разбрызгивания жидкости основан на разрушении пленки жидкости под действием центробежной силы, образующейся при высокооборотном вращении диска (до 12 000 мин⁻¹).

Использование после известкового распылительно-испарительного абсорбера (полусухого скруббера) рукавного фильтра (в отличие от электрофильтра) способствует эффективному снижению концентрации «кислых» газов в дымовых газах, удаляя более 90% HCl, HF и более 70% SO₂ (см. табл. 5.3).

Таблица 5.3

**Эффективность удаления некоторых вредных веществ (%)
с использованием рукавного и электрофильтра
при полусухом методе очистки дымовых газов**

Вредные вещества	Комбинация полусухого скруббера	
	с рукавным фильтром	с электрофильтром
HCl	98–99	90–98
HF	98–99	90–98
SO ₂	67–90	15–50
ПХДД	98,7–99,5	48–89
ПХДФ	98,7–99,5	64–85
Hg	75–85	35–45
Pb	95–99,7	65–75
Cd	95–99,8	95–97
As	95–99,9	93–98

Из таблицы 5.3 видно, что с точки зрения снижения выбросов, в том числе ПХДД/ПХДФ, комбинация полусухого скруббера с рукавным фильтром более эффективна, чем с электрофильтром. Например, удаление диоксинов и фуранов из дымовых газов при такой комбинации приближается к 100%.

Рассматриваемая система газоочистки способна эффективно очищать продукты сгорания ТКО от всех тяжелых металлов. Исключение составляет ртуть, для которой эффективность очистки несколько ниже.

Полусухой метод очистки имеет много модификаций. В качестве примера одной из современных модификаций полусухого метода можно привести NID-технологии (новая интегрированная десульфатизация), разработанную фирмой Альстом.

В эту систему очистки газов входят следующие основные элементы: газоходы от котла до рукавного фильтра с оборудованием для ввода щелочного реагента и активированного угля (NID-реактор), рукавный фильтр, газоходы от рукавного фильтра до дымососа, дымосос с приводом, шумоглушитель, газоходы от шумоглушителя до дымовой трубы. Примерная схема расположения оборудования представлена на рис. 5.5

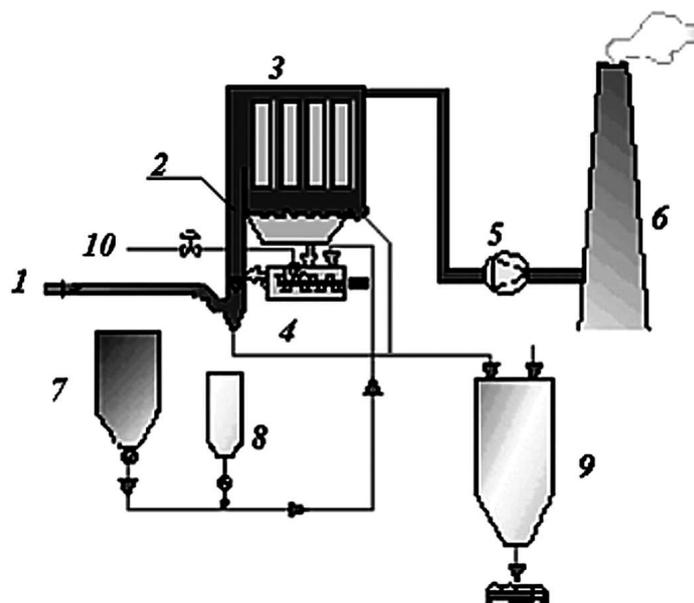


Рис. 5.5. Технологическая схема очистки газообразных продуктов сгорания ТКО по NID-технологии фирмы Альстом:

- 1 – вход дымовых газов; 2 – NID-реактор; 3 – рукавный фильтр;
 4 – смеситель-увлажнитель; 5 – дымосос; 6 – дымовая труба; 7 – бункер извести;
 8 – бункер угля; 9 – бункер продуктов газоочистки; 10 – подача воды

Продукты сгорания ТКО после котла с температурой около 190°C поступают в NID-реактор, где смешиваются с увлажненным веществом, состоящим из рециркулирующих продуктов газоочистки рукавного фильтра, извести и активированного угля. Далее, во время движения по футерованному газоходу (NID-реактору) к рукавному фильтру, за счет испарения воды происходит снижение температуры продуктов сгорания до величины, необходимой для эффективной сорбции щелочных компонентов (130–140°C). В рукавном фильтре осуществляется очистка дымовых газов от твердых частиц, после чего очищенные дымовые газы дымососом направляются в дымовую трубу. Уловленные продукты газоочистки частично возвращается в NID-реактор (рециркулирующие продукты газоочистки). Часть продуктов газоочистки выгружается из системы и пневмотранспортом направляется в бункер продуктов газоочистки.

Смешение воды, извести, рециркулирующей золы и активированного угля происходит в увлажнителе (рис. 5.6), который интегрирован в реактор. Интеграция увлажнителя и реактора обеспечивает равномерное распределение реагентов (извести и угля) в реакторе и эффективно перемешивает потоки газа и сорбента во всем диапазоне нагрузок.

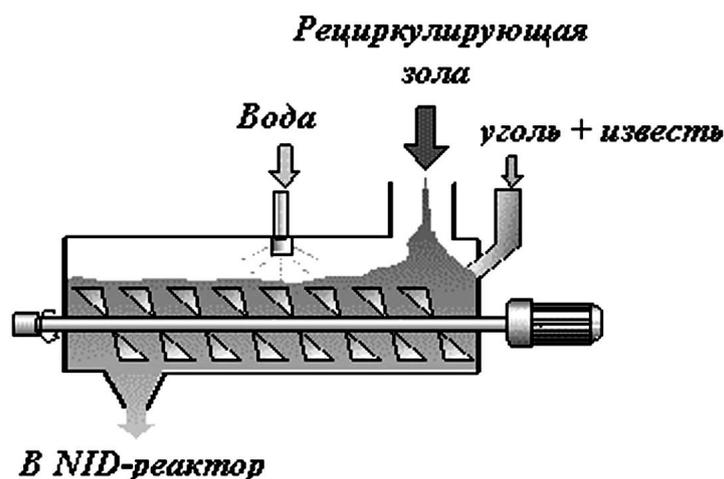


Рис. 5.6. Смеситель-увлажнитель, используемый в NID-технологии

Работа системы газоочистки автоматизирована. Процесс связывания «кислых» газов регулируется в зависимости от измеренных концентрации HCl и SO_2 на входе и выходе регулированием подачи извести с помощью объемного дозатора. Подача воды в смеситель-увлажнитель регулируется по разнице температур на входе в газоочистку и на выходе из нее и входной влажности дымовых газов. Расход рециркулирующей золы зависит от количества впрыскиваемой воды и задается по соотношению «расход воды – обороты питателя».

Мокрая очистка дымовых газов

Использование мокрых скрубберов для снижения выбросов разных веществ практикуется с начала 70-х гг. Добавляя щелочь (NaOH или $\text{Ca}(\text{OH})_2$) в скрубберы-золоуловители, можно было также значительно снизить уровень «кислых» газов (HCl , HF , SO_2) и перевести их в водный раствор в виде солей или шлама. Некоторые мокрые скруббера, спроектированные для очистки «кислых» газов, за счет ввода специальных химических реагентов позволяли также удалять из газов некоторое количество NO_x .

Мокрая очистка дымовых газов комбинируется, как правило, с отделением твердых веществ в сухом золоуловителе и обработкой сточных вод перед сбросом их в канализацию или испарением сточных вод во избежание их обработки (бессточный процесс).

Несмотря на то, что мокрые скрубберы пригодны как для улавливания летучей золы, так и вредных газовых компонент, оптимальным является разделение этих двух задач. При этом повышается эффективность обоих процессов и облегчается удаление продуктов очистки.

Для очистки «кислых» газов используются достаточно много типов мокрых скрубберов: башенных, центробежных, с трубой Вентури. В меньшей степени используются скрубберы с насадкой и тарельчатые скрубберы. Скрубберы выполняются как правило двух-, а иногда и трех-ступенчатыми. Например, первая ступень может быть предназначена для поглощения преимущественно HCl и HF и быть «кислой», вторая – для поглощения SO_2 и быть «щелочной».

На рисунке 5.7 изображен так называемый «радиально-поточный скруббер» мокрой очистки газов, разработанный немецкой фирмой «Лурги».

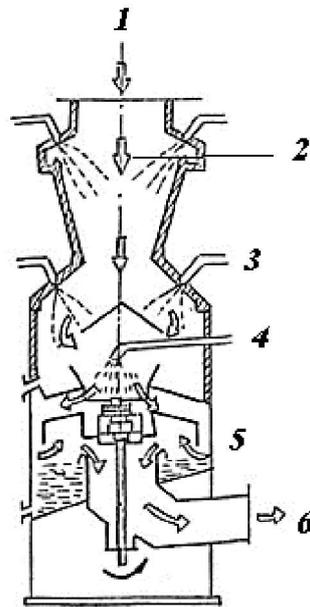


Рис. 5.7. Радиально-поточный скруббер фирмы «Лурги»:

1 – вход газа; 2 – зона насыщения; 3 – 1-я ступень промывки; 4 – 2-я ступень промывки; 5 – каплеуловитель; 6 – выход газа

Дымовые газы поступают в скруббер сверху вниз. В верхней части, выполненной в форме трубы Вентури, обеспечивается интенсивный контакт дымовых газов с промывочной жидкостью и насыщение их. Подвод жидкости осуществляется через сопла в верхнем перекрытии скруббера. После ускорения поток газов тормозится в расширяющейся части трубы Вентури, где также размещены форсунки зоны промежуточного орошения. Обе зоны орошения составляют первую ступень промывки газов. Затем газ поступает во вторую ступень промывки, в собственно радиально-поточную зону.

Однокорпусной мокрый скруббер башенного типа показан на рис. 5.8.

Мокрый метод является наиболее эффективным методом удаления всех «кислых» газов, но его применение сопровождается производством заметного количества загрязненных сточных вод.

Существуют различные варианты включения в схему газоочистки, упомянутых выше аппаратов: золоуловитель, абсорбер, скруббер (одно- или двухступенчатый), теплообменник, испаритель.

В качестве примера на рис. 5.9 представлена схема комбинированной очистки дымовых газов на установках, сжигающих ТКО в г. Кобурге: распылительно-испарительный процесс (поз. 1–3) и двухступенчатый мокрый скруббер (поз. 6, 7).

Подобная технология получила распространение на ряде современных зарубежных предприятиях, сжигающих ТКО, в конце прошлого века.

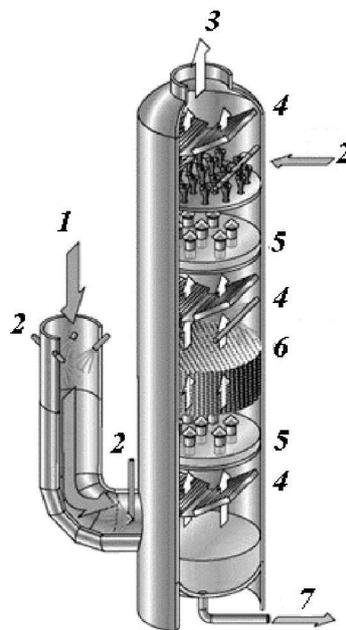


Рис. 5.8. Схема однокорпусного мокрого скруббера башенного типа:

- 1 – вход дымовых газов; 2 – подача воды; 3 – выход дымовых газов;
- 4 – каплеотделитель; 5 – уравниватель; 6 – подача раствора извести;
- 7 – отработанная вода

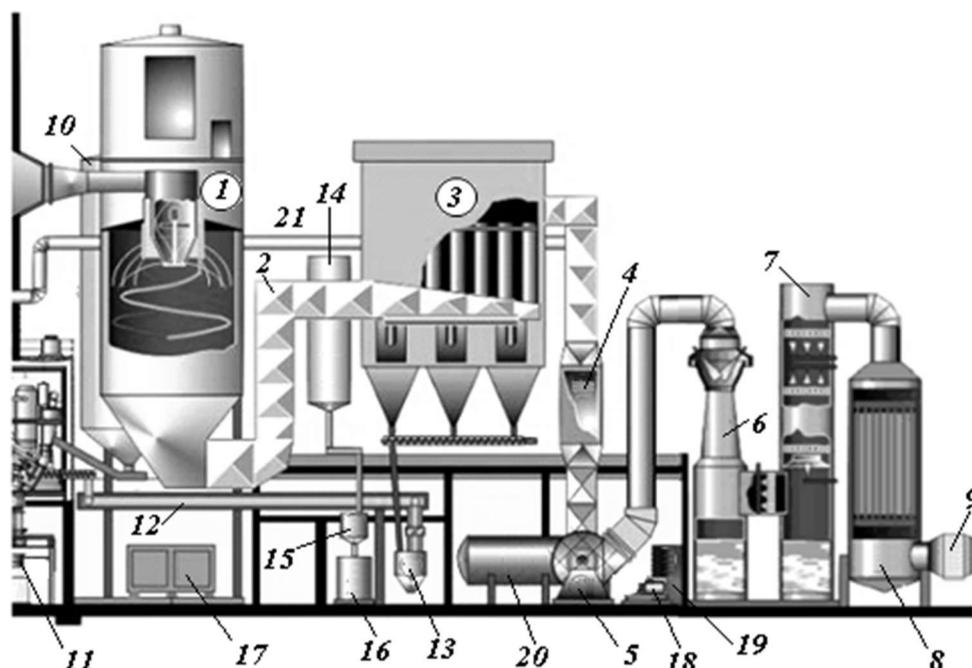


Рис. 5.9. Схема процесса очистки дымовых газов на ТЭС, сжигающей ТКО в г. Кобурге (Германия):

1 – полусухой скруббер; 2 – газоход; 3 – рукавный фильтр; 4 – шумоглушитель; 5 – дымосос; 6, 7 – двухступенчатый мокрый скруббер; 8 – мокрый электрофильтр; 9 – подогреватель дымовых газов; 10 – силос продуктов газоочистки; 11–13 – система пневмотранспорта; 14 – силос извести; 15 – дозатор извести; 16 – бак известкового молока; 17 – компрессор; 18 – насос; 19 – бак NaOH; 20 – бак запаса воды; 21 – рециркуляция дымовых газов

5.2.2. Технологии снижения выбросов оксидов азота

Наиболее простым методом денитрификации дымовых газов является *метод селективного некаталитического восстановления оксидов азота* (в России – СНКВ, за рубежом SNCR) с использованием аммиака или его производных (карбамида, циануровой кислоты, меламин, формамида и др.), которые вводятся в поток дымовых газов через систему охлаждаемых инжекторов, располагаемых внутри газоходов котла.

Наиболее эффективно восстановление NO_x происходит в интервале температур 870–1 100°C в течение примерно 0,6 сек. Следует отметить, что эти условия (по температуре и времени) оптимально выполняются в котлах для сжигания отходов, где для подавления образования ПХДД/ПХДФ предусматривается специальная зона, в которой дымовые газы выдерживаются в диапазоне температур 850–1 000°C не менее 2 секунд.

Несмотря на то, что коэффициент полезного действия установок с применением технологии СНКВ невысок и находится в пределах 40–70%, для достижения требуемых показателей по выбросам NO_x (см. табл. 5.2) этого вполне достаточно.

На рисунке 5.10 представлена принципиальная технологическая схема установки СНКВ, разработанная российскими специалистами и реализованная на московском СЗ № 2.

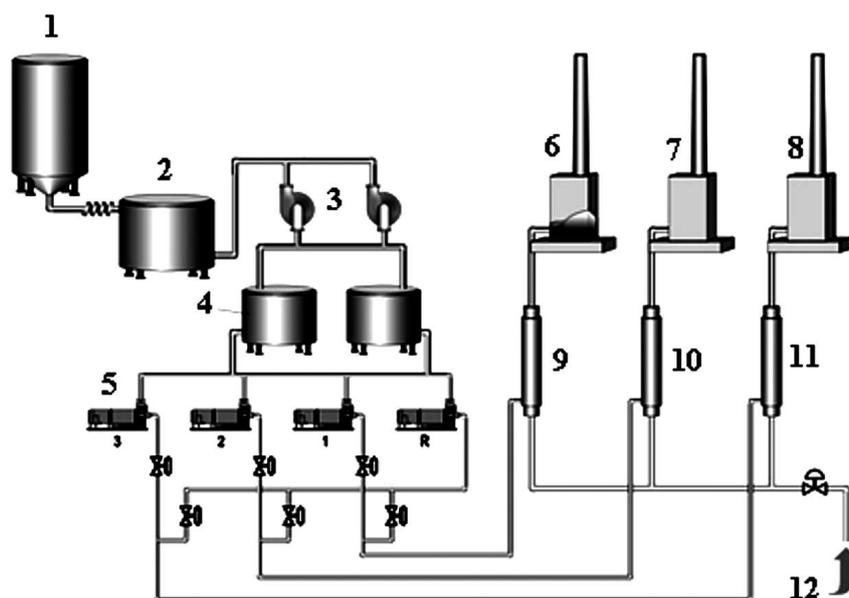


Рис. 5.10. Принципиальная технологическая схема установки СНКВ на московском СЗ № 2

- 1 – хранилище твердого карбамида; 2 – бак для приготовления раствора карбамида;
 3 – перекачивающие насосы; 4 – рабочие емкости раствора карбамида (баки-мерники); 5 – насосы-дозаторы; 6, 7, 8 – котел;
 9, 10, 11 – смеситель-испаритель; 12 – пар

В качестве реагента применена производная аммиака – карбамид (мочевина) которая имеет значительно меньшую токсичность по сравнению с аммиаком.

Процесс очистки дымовых газов от оксидов азота карбамидом протекает в соответствии с реакцией:



Работа установки происходит следующим образом. Твердый карбамид загружается в бак для приготовления 40%-го раствора. Раствор карбамида перекачивается в баки-мерники и далее насосами – дозаторами подается в смесители-испарители, куда также поступает перегретый пар. Восстановительная парогазовая смесь после смесителей-испарителей

направляется через специальные распределительные устройства в расчетную зону котла, где и происходит процесс восстановления оксидов азота (температура дымовых газов в зоне ввода парогазовой смеси 900–950°С, время контакта с дымовыми газами при данной температуре более 1,0 с).

Представленная на рис. 5.10 принципиальная технологическая схема является типовой для процессов некаталитического восстановления оксидов азота на ТЭС, сжигающих ТКО, и широко применяются на подобных установках за рубежом.

В установках *селективного каталитического восстановления* (СКВ, в международной классификации SCR) денитрификация дымовых газов протекает в каталитическом реакторе, в активной зоне которого, в несколько слоев, размещаются сменные модули с каталитическими элементами.

Метод СКВ основан на реакции восстановления оксидов азота аммиаком на поверхности катализатора в присутствии кислорода. В результате прохождения реакции образуются экологически безопасные продукты N_2 и H_2O .

Принцип работы селективного каталитического реактора (восстановления) представлен на рис. 5.11



Рис. 5.11. Принцип работы селективного каталитического восстановления оксидов азота

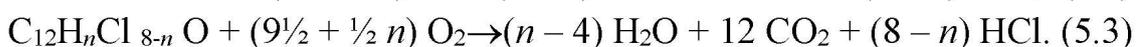
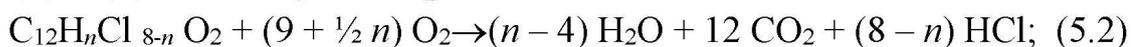
Требуемое мольное соотношение NH_3/NO_x обычно составляет 0,9–1,0, при этом определяющим фактором эффективной работы каталитического реактора является соблюдение указанного мольного соотношения по всему сечению реактора.

Эффективность каталитической очистки дымовых газов выше, чем при некаталитических методах и может достигать 90–92 %, но она и значительно дороже. Поэтому обычно метод СКВ применяют в тех случаях, когда следует максимально снизить выбросы оксидов азота. Например, если фоновая концентрация NO_x в районе расположения предприятия для термической переработки ТКО достаточно высокая, и дополнитель-

ные выбросы оксидов азота должны быть настолько минимизированы, чтобы не допустить превышения предельно допустимой величины.

Со временем по мере загрязнения и отравления катализатора эффективность СКВ снижается. Для поддержания высокой эффективности процесса СКВ в течение всего срока службы катализатора, который обычно составляет 16–32 тыс. ч, производят его периодическую очистку паром от наружных отложений, а также перестановку модулей катализаторов с периферии в центральную часть, с нижних слоев на верхние. Кроме того, в процессе эксплуатации добавляется до 30% новых модулей с катализаторами. Отметим, что стоимость катализаторов достигает 50% стоимости всей установки СКВ, а их общая масса может составлять несколько тонн.

Существует два варианта размещения каталитического реактора: в рассечку между конвективными поверхностями нагрева (чаще до экономайзера) котла и после золоуловителя. В последнем случае, требуется подогрев дымовых газов до температуры около 350°C. Тем не менее, на установках, сжигающих ТКО, чаще применяют второй вариант, поскольку в этом случае в каталитическом реакторе частично разлагаются также ПХДД/ПХДФ по следующим реакциям:



Принципиальная схема установки реактора СКВ на установках, сжигающих ТКО, представлена на рис. 5.12.

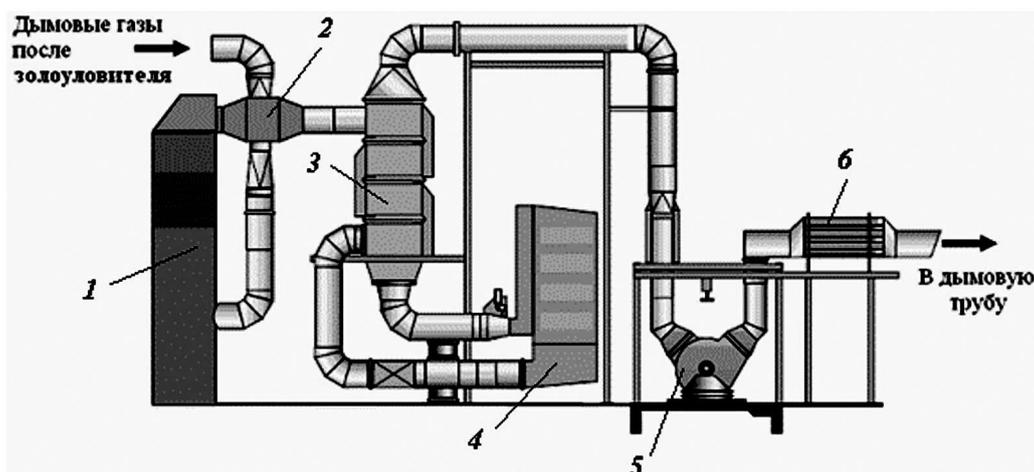


Рис. 5.12. Принципиальная схема СКВ-технологии подавления NO_x:

- 1 – увлажнитель; 2 – теплообменник; 3 – теплообменник подогрева газа перед СКВ;
4 – каталитический реактор; 5 – дымосос; 6 – шумоглушитель

5.2.3. Мероприятия по снижению выбросов ПХДД/ПХДФ

Одной из основных причин, ранее препятствующей широкому использованию термических методов переработки ТКО, является так называемая «диоксиновая» проблема.

Во многом это было связано с тем, что на «старых» заводах для улавливания использовались только электрофильтры, которые сами могут при определенных условиях способствовать генерации ПХДД/ПХДФ [23]. В противоположность этому при использовании для улавливания золы рукавных фильтров в условиях низких температур, характерных для их работы, твердые частицы летучей золы, содержащие ПХДД/ПХДФ, легко адсорбируются тканью рукавных фильтров. При использовании в качестве адсорбирующего материала активированного угля степень очистки по ПХДД/ПХДФ доходит до регламентируемого уровня – ниже $0,1 \text{ нг/м}^3$.

В этой связи в 90-е гг. прошлого столетия началась массовая реконструкция газоочистного оборудования на существующих предприятиях, специализирующихся на термической переработке ТКО, направленная на переход от электрофильтров на рукавные с использованием активированного угля в качестве сорбента для улавливания диоксинов и фуранов. Так, например, в Германии к 1994 г. практически на всех предприятиях, находившихся в эксплуатации (примерно 50 заводов, 140 установок), была установлена многоступенчатая газоочистка, включающая эти элементы. За счет этого общий валовый выброс ПХДД/ПХДФ уже в то время сократился более чем в 10 раз.

В последующие годы (после 1996 г.) по мере дальнейшего ужесточения экологических требований в качестве дополнительной ступени улавливания ПХДД/ПХДФ иногда начали использовать, так называемый, «полицейский» (санитарный) фильтр, который представляет собой дополнительный рукавный фильтр, через который циркулирует активированный уголь или какое-либо другое вещество, адсорбирующее диоксины и фураны.

На рисунке 5.13 показана схема такого фильтра, где в качестве последней ступени используют комбинацию реактора с кипящим слоем, в который подают цеолит, и рукавный фильтр.

Применение угольных («полицейских») фильтров, безусловно, оправдано для котлов «старой» конструкции. Вместе с тем, опыт эксплуатации показал, что для достижения регламентируемых значений концентраций ПХДД/ПХДФ ($0,1 \text{ нг/м}^3$) достаточно выполнить реконструкцию или полную замену котлов (для обеспечения требуемых условий сжигания ТКО) и в системе газоочистки использовать обычный рукавный

фильтр с предварительным вводом в поток дымовых газов активированного угля. В этом случае применение угольного («полицейского») фильтра теряет всякий смысл.

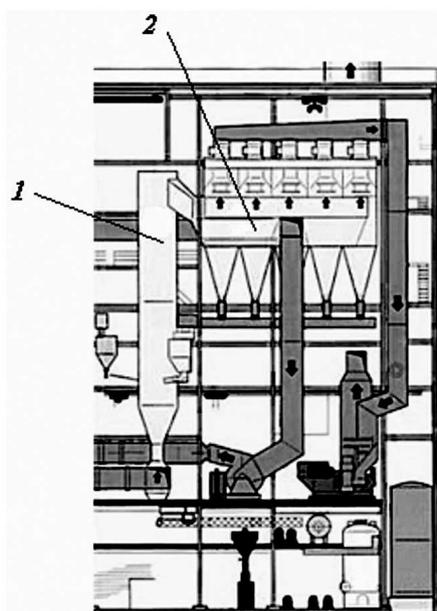


Рис. 5.13. Схема «полицейского» фильтра (комбинация реактора циркуляции цеолита и рукавного фильтра) на ТЭС, сжигающей отходы, в г. Изерлоне (Германия):
1 – реактор циркуляции цеолита; 2 – рукавный фильтр

Наряду с использованием в системах газоочистки адсорбционного метода (применение активированного угля), с начала 90-х гг. стало развиваться другое направление для снижения концентрации ПХДД/ПХДФ в продуктах сгорания ТКО – каталитическое окисление отходящих газов.

Было установлено, что катализаторы, применяемые обычно для восстановления оксидов азота аммиаком (СКВ-катализаторы), обладают хорошими окислительными свойствами для эффективного связывания органогалогенных соединений, в частности, ПХДД/ПХДФ (см. реакции (5.2)–(5.3)). Наиболее предпочтительными оказались СКВ-катализаторы на базе оксида титана TiO_2 и оксида железа Fe_2O_3 , которые уже при температурах 250–300°C проявляют высокую окислительную активность. Таким образом, становится возможным применение СКВ-катализаторов (при некотором увеличении объема катализатора) как комбинированных для одновременного восстановления NO_x и окисления ПХДД/ПХДФ.

Такое решение апробировано на ряде зарубежных установках. В России первая такая схема для ТЭС, сжигающей ТКО, применена на реконструированном московском спецзаводе №3.

Другим примером каталитического устройства, специально применяемого для снижения ПХДД/ПХДФ, является фильтр, установленный на предприятии для сжигания ТКО «Termizo a.s.» в г. Либереце (Чехия).

Принцип действия такого диоксинового каталитического фильтра показан на рис. 5.14. При прохождении потока газов через поверхность фильтра происходит разложение диоксинов и фуранов на CO_2 , H_2O и хлористый водород (HCl), который потом улавливается в скруббере. На этом предприятии концентрация ПХДД/ПХДФ в дымовых газах на выходе из фильтра в среднем составляет $0,017 \text{ нг/нм}^3$, что существенно меньше установленного предельного допустимого значения ($0,1 \text{ нг/нм}^3$).

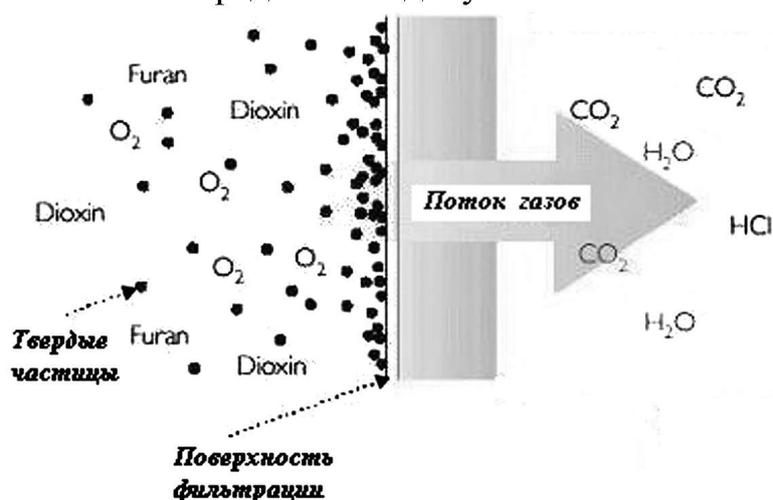


Рис. 5.14. Принцип действия диоксинового каталитического фильтра, установленного на предприятии для сжигания ТКО в г. Либереце, Чехия

В заключение следует отметить, что на сегодня проблема с выбросами ПХДД/ПХДФ в окружающую среду на установках, сжигающих ТКО, технически решена. Применение того или иного метода их подавления определяется исходя из экономической эффективности и местных условий (существующего фона, социально-политической обстановки в регионе и т.д.).

5.3. Технические решения, делающие современную ТЭС на ТКО экологически безопасным предприятием

Можно с уверенностью утверждать, что все основные проблемы, связанные с воздействием на окружающую среду ТЭС, сжигающих ТКО, технически решаемы. Разумный подход к практической реализации природоохранных мероприятий на этих ТЭС делает ее экологически безопасным предприятием. Это признается многими международными организациями. Например, агентство по охране окружающей среды США

отметило, что «выработка энергии из отходов оказывает меньшее негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с другими способами выработки электроэнергии» [24].

Благодаря экологической безопасности, современные ТЭС на ТКО без проблем интегрируются в городской и природный ландшафт, часто располагаясь вблизи центральной части города. Так, завод «Селип» в Лондоне находится менее чем в 3 км от Тауэрского моста, а завод в Монако – в нескольких сотнях метров от княжеского дворца. В Вене аналогичный завод для термической переработки ТКО является одной из достопримечательностей австрийской столицы, фото которого публикуется в путеводителях.

Еще одним примером современного предприятия для термической переработки ТКО может служить запущенный в эксплуатацию в 2017 г. WTE Amager Bakke в Копенгагене (Дания). Завод довольно мощный: в 2018 г. переработал около 451,0 тыс. ТКО. Тем не менее, система газоочистки гарантируемо обеспечивает экологически безопасную работу завода с минимальными выбросами. (Например, предельная величина концентраций NO_x в дымовых газах не превышает 15 мг/м^3). Это позволило на крыше завода, выполненной с уклоном 45° и высотой 85 м, в 2019 г. открыть круглогодичный искусственный горнолыжный склон, длиной 450 м и разворотом на 180° , и проложить пешеходные тропы с высаженными вокруг кустарниками и хвойными деревьями [10].

Безусловно, отечественные ТЭС на ТКО должны соответствовать современным международным стандартам в области охраны окружающей среды. По результатам аналитического обзора существующих и разрабатываемых систем газоочистки на зарубежных ТЭС на ТКО и по результатам выполненных экспериментально-расчетных исследований в [1] были сформулированы технические решения, которые могут служить основой при проектировании системы газоочистки для типовых отечественных ТЭС на ТКО и делающие эти электростанции экологически безопасными предприятиями.

При разработке этих решений, прежде всего, принималось во внимание то, что за рубежом в последнее время для очистки газообразных продуктов сгорания ТКО от «кислых» газов наибольшее предпочтение отдается сухим и полусухим методам, которые наряду с приемлемыми инвестиционными и эксплуатационными затратами, а также простой концептуальной схемой установки и компактной застройкой обеспечивают уверенное соблюдение требований, предъявляемых Европейской Директивой 2000/76/ЕС [13] по выбросам вредных составляющих с дымовыми газами при сжигании ТКО.

Как было показано выше, на существующих современных российских (московских) заводах для термической переработки отходов также приме-

няют полусухой метод: нейтрализацию «кислых» газов осуществляют в абсорбере за счет прямого контакта с известковым молоком, которое разбрызгивается с большой скоростью распылительной машиной. Опыт эксплуатации московских спецзаводов показал, что для таких абсорберов важными моментами являются хорошая аэродинамика газообразных продуктов сгорания ТКО в абсорбере и тонкий, монодисперсный распыл жидкости. К сожалению, это не всегда достижимо, поскольку в ряде случаев расход дымовых газов может существенно отличаться от расчетного, а это приводит к ухудшению аэродинамики в абсорбере и, как следствие, к снижению эффективности улавливания «кислых» газов, повышению расхода реагента и, что самое неприятное, к накоплению отложений на стенках абсорбера.

В этой связи для очистки газообразных продуктов сгорания ТКО от «кислых» газов целесообразно использовать системы газоочистки, в которых вместо прямого распыла известкового молока в дымовые газы вводится увлажненный рециркулят – сорбент, обладающий хорошей текучестью, сравнимой с текучестью сухой пыли. Образование влаги на поверхности реагента и в его порах вследствие капиллярной конденсации, – является положительным моментом. Во время испарения воды вокруг частицы сорбента образуется зона почти со 100 %-ой относительной влажностью, что позволяет в условиях оптимально выбранных температуры и продолжительности контакта сорбентов с газовой фазой, достичь высокой степени очистки от «кислых» газов.

Для ограничения выбросов NO_x в атмосферу рекомендуется использовать метод селективного некаталитического восстановления оксидов азота различными азотсодержащими веществами, которые вводят в первый газопоток котла.

Требуемая очистка дымовых газов от ПХДД/ПХДФ достигается применением комбинации адсорбционного метода (например, распыл активированного угля в поток дымовых газов перед рукавным фильтром) и эффективного улавливания твердых частиц в рукавном фильтре.

Таким образом, многоступенчатая газоочистка ТЭС на ТКО должна включать в себя как минимум систему СНКВ, оборудование для улавливания «кислых» газов, систему подачи угольного реагента и рукавный фильтр. Такая газоочистка позволит получить даже более низкие показатели по содержанию регламентируемых веществ в газообразных продуктах сгорания ТКО, чем приведенные в табл. 5.2.

5.4. Свойства твердых остатков, образующихся при термической переработке ТКО, и рекомендации по их дальнейшей утилизации

5.4.1. Характеристика твердых остатков

В процессе термической переработки ТКО образуются три основных вида твердых остатков: шлак, выгружаемый из топочного устройства (до 90% (по массе) всех твердых остатков при сжигании на колосниковой решетке и 70–80% – при сжигании в топках с вихревым кипящим слоем); зола уноса, уловленная в котле и в золоулавливающих аппаратах системы газоочистки до ввода реагентов в поток дымовых газов (10–30 кг/т ТКО при сжигании на колосниковой решетке и до 80 кг/т ТКО – при сжигании в ВКС); продукты газоочистки – смесь твердых продуктов реакций, остатков реагентов и мелкофракционной остаточной золы уноса (25–35 кг/т ТКО).

Состав шлака во многом зависит от вида сжигаемых ТКО и способа сжигания. При слоевом сжигании на колосниковой решетке вещественный состав шлака следующий: так называемая силикатная часть – 80–85%, металлические включения – 15–20% и мягкая часть (несгоревший картон, полиэтилен, текстиль) – 0–0,8%. При сжигании отходов в топках с вихревым кипящим слоем с предварительным измельчением ТКО и удалением металла на стадии их подготовки в шлаке практически отсутствуют органические и металлические включения.

Результаты определения фракционного состава, выполненные на московских заводах [1], показывают, что при слоевом сжигании на механической колосниковой решетке шлак является грубодисперсным материалом. Частицы с размерами свыше 10 мм составляют 39–44%, от 1 до 10 мм – 37–43%, от 1 до 0,05 мм – только 16–17%. Шлак, образующийся в процессе сжигания подготовленных ТКО в вихревом кипящем слое (зола слоя) имеет более однородную структуру. Частицы с размерами свыше 10 мм составляют 28–30%, от 1 до 10 мм – 24–55%, от 1 до 0,2 мм – 15–46%, менее 0,2 мм – практически отсутствуют.

Данные по элементному составу (в пересчете на оксиды) силикатной части шлака при сжигании ТКО на обратно-переталкивающей решетке и золы слоя при сжигании отходов в вихревом кипящем слое представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

**Элементный состав (в пересчете на оксиды) твердых остатков,
образующихся в процессе термической переработки ТКО,
на московских СЗ, % (по массе)**

Элементы	Шлак		Зола-уноса			Продукты газоочистки СЗ №4
	СЗ №2	СЗ №4 (зола слоя)	СЗ №2 (после котла)	СЗ №4 (после котла)	СЗ №4 (после циклона)	
SiO ₂	49,7–62	81–85,3	29–43,2	54,9–77	19–34,7	2,6–29,2
TiO ₂	0,3–0,6	0,2–0,4	0,9–2,6	0,6–0,8	1,1–1,4	0,4–2,7
Al ₂ O ₃	3,2–11,8	1,4–2,5	7,2–13,6	4,5–11,1	9,2–11,9	0,8–13,8
Fe ₂ O ₃	1,1–5,0	0,9–2,0	1,5–5,9	0,7–2,4	2,0–2,8	0,4–2,2
CaO	12,5–19	5,2–6,8	13,8–37	10,8–19	23,7–33	20,5–59,8
MgO	1,5–2,3	0,5–0,7	1,5–2,5	0,5–1,3	2,0–2,9	0,7–5,6
K ₂ O	0,7–2,0	0,5–0,8	0,5–4,5	0,9–1,4	1,6–2,2	2,1–12,1
Na ₂ O	0,5–10,6	3,3–4,5	2,2–6,5	1,3–2,1	2,5–3,1	1,2–14,2
SO ₃	2,1–4,9	1,2–5,2	4,5–8,6	1,2–6,5	5,5–7,6	1,85–12,6
P ₂ O ₅	1,3–6,7	0,6–4,3	2,1–6,5	0,5–2,1	2,9–3,6	0,5–3,3
Cl	0,2–2,3	0,2–0,5	0,8–2,7	0,3–1,4	2,7–4,2	4,6–18,9

Свойства золы уноса, как и свойства шлака, зависят от состава отходов и способа их сжигания. Гранулометрический состав золы уноса представлен в табл. 5.5, элементный – в табл. 5.4.

Таблица 5.5

**Гранулометрический состав, % (по массе), шлака и золы уноса,
образующихся при сжигании ТКО на московских СЗ**

Размер ячейки сит, мкм	Зола-уноса	
	СЗ №2	СЗ №4
1 000	2,2–3,1	0–0,08
630	9,1–10,0	0–0,16
400	24,7–26,6	0–5,9
200	60,7–63,1	44,3–51,4
90	81,1–84	71,6–80,8
63	88,4–90,6	78,9–90,2
50	91,4–93,8	81,0–95,2
Дно	100,0	100,0

Содержание микроэлементов во всех твердых продуктах сгорания ТКО (шлак, зола уноса) колеблется в пределах 6 000–8 100 мг/кг (табл. 5.6).

**Содержания микроэлементов, мг/кг, в твердых остатках,
образующихся в процессе термической переработки ТКО
на московских СЗ**

Элементы	Шлак		Зола-уноса			Продукты газоочистки СЗ №4
	СЗ №2	СЗ №4 (зола слоя)	СЗ №2 (после котла)	СЗ №4 (после котла)	СЗ №4 (после циклона)	
Ртуть (Hg)	0–0,1	—	0,3	—	0–0,1	0–1,3
Кадмий (Cd)	0–5,6	—	50	—	25	58–130
Свинец (Pb)	1 655–2 701	215–379	146–1 100	502–816	1 200–2 300	1 380–10 725
Кобальт (Co)	6,7–33	17	7–17	8–34	13–37	6–23
Хром (Cr)	179–181	99–140	470–870	191–304	480–690	260–1 300
Марганец (Mn)	332–593	180–410	800–1 000	362–1 240	1 309	501–830
Никель (Ni)	26–60	13–26	47–61	34–79	90–120	64–110
Мышьяк (As)	4–12	3–12	2,5–10	< 3	3–8,5	5–11
Сурьма (Sb)	26–44	—	90	—	120– 190	140–390
Медь (Cu)	925–2 290	529–669	370–580	1 290–2 760	2 600–3 200	1 800–6 235
Ванадий (V)	15–16	8–19	20–27	13–16	23–32	10–34
Цинк (Zn)	1 267–4 000	547–1 130	1 369–3 180	2 175–3 970	7 900–13 100	4 500–12 540
Стронций (Sr)	350–672	130–337	410–530	260–470	470–900	230–1 300

Превалирующими в них элементами являются цинк, свинец, медь, марганец, хром и стронций, суммарная доля которых составляет 93–95% общего содержания микроэлементов. Заметно обогащение золы уноса кадмием, хромом, ртутью, сурьмой и марганцем по сравнению со шлаком.

С использованием полученных данных была выполнена оценка класса опасности шлака и золы уноса для окружающей среды по действующим в РФ нормативам [25], которая показала, что эти отходы относятся к 4-му или даже к 5-му классу опасности (практически не опасные). Это позволяет рассмотреть возможность их дальнейшей переработки с получением товарной продукции, в том числе на территории ТЭС.

5.4.2. Утилизация золошлаковых остатков

За рубежом в зависимости от свойств ТКО, способа сжигания, конкретных местных условий, потребителя товарного продукта и т.д. на предприятиях, сжигающих ТКО, выбирают ту или иную технологию утилизации ЗШО или в некоторых случаях даже разрабатывают новую. Вместе с тем требования к качеству ЗШО для их дальнейшего использования в основном сведены к следующему:

- Доля горючих веществ (содержание несгоревшего углеродистого остатка) не должна превышать 5% от сухой массы.
- В случае вымывания водой максимально допустимое количество растворенных в воде веществ должно составлять не более 2 % от сухой массы ЗШО.

Выполнение нормативов по содержанию горючих веществ в золошлаковых остатках является определяющим. Следует сказать, что согласно европейским требованиям, их содержание в ЗШО более 5 % существенно ограничивает не только возможность их дальнейшей утилизации ЗШО, но и вызывает значительные проблемы с вывозом их на захоронение.

Для определения истинного содержания горючих веществ в ЗШО предложена оригинальная методика их оценки [1]. Дело в том, что принятый в отечественной теплоэнергетике способ определения горючих веществ по потерям массы при прокаливании (п.п.п.) для золошлаковых остатков ТКО дает заведомо завышенные результаты.

В [1] показано, что значительная часть п.п.п. ЗШО связана с удалением гигроскопической и кристаллогидратной влаги, а также с разложением карбонатов кальция с выделением CO_2 . П.п.п. за счет выгорания горючих веществ (органической части и коксового остатка) в силикатной части шлака (наиболее проблемной и оказывающей определяющее влияние на общее значение этих потерь) при сжигании ТКО на колосниковой решетке составляют только 12–34% общих потерь при прокаливании. При сжигании ТКО в вихревом кипящем слое в шлаке (крупной фракции золы слоя, отводимой из топки) они вообще не обнаружены.

Содержание горючих в золе-уноса по обеим технологиям сжигания также, как и в случае шлака, незначительно. При сжигании ТКО в топках с колосниковыми решетками п.п.п. золы-уноса довольно значительны (14–25,6%). Тем не менее, основные потери связаны с удалением воды

при дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и алюмосиликатов, а также с удалением CO_2 из карбоната кальция. П.п.п. за счет выгорания горючих веществ не превышают 2%.

В золе-уноса, уловленной в котле-утилизаторе и циклоне, при сжигании ТКО в вихревом кипящем слое п.п.п., связанные с выгоранием горючих веществ, также малы и составляют примерно 1,3%.

Таким образом, как правило, ЗШО, образующиеся при сжигании ТКО с использованием, как технологии слоевого колосникового сжигания, так и технологии вихревого кипящего слоя, удовлетворяют требованиям по содержанию горючих и пригодны для дальнейшей утилизации.

Для снижения содержания легко растворимых компонентов в ЗШО применяют два основных метода: цементация ЗШО с использованием различных связующих и их переплавка.

Метод цементации основан на склонности золошлаковых остатков от сжигания ТКО к самоотвердеванию. Однако лабораторные испытания показали, что прочность отвердевшей смеси недостаточна для самостоятельного использования, например, в строительной индустрии. Для усиления композиции в ЗШО добавляется цемент с получением шлакоблоков непосредственно на территории ТЭС. На образцах, изготовленных с добавлением песка и цемента марки 400, исследовалось влияние на выщелачивание микроэлементов, для которых существуют предельно допустимые концентрации (ПДК) в почве по подвижным формам, т.е. марганца, меди, хрома, свинца, кобальта и никеля. С использованием полученных закономерностей миграций тяжелых металлов из образцов бетонных изделий проведены расчеты, которые показали, что содержание тяжелых металлов в подвижных формах в образцах бетонов значительно ниже (в 2–20 раз) ПДК подвижных форм этих элементов в почве.

Метод переплавки основывается на преобразовании ЗШО путем нагрева до температуры, превышающей температуру плавления, равную приблизительно 1200°C , в стеклообразный гранулированный материал, удовлетворяющий всем условиям не только для получения, например, щебня для отсыпки дорог, но и для промышленного использования в стройиндустрии. Целесообразность использования переработки ЗШО по методу переплавки на территории ТЭС должна определяться на стадии технико-экономического обоснования.

5.4.3. Переработка продуктов газоочистки

Твердые продукты газоочистки, находящиеся на границе 3–4 класса опасности для окружающей природной среды, требуют более глубокую по сравнению с ЗШО переработку. В этой связи, а также с учетом того, что твердых продуктов газоочистки образуется в разы меньше, чем, например, шлака, переработку продуктов газоочистки на территории ТЭС осуществлять экономически нецелесообразно. Эта операция должна выполняться на специализированных предприятиях, на которые будут поступать аналогичные отходы с других объектов (и не только сжигающих ТКО). Там должна быть организована их централизованная переработка с утилизацией ценных компонентов, содержащихся в продуктах газоочистки.

Для переработки твердых продуктов газоочистки целесообразно рассматривать термические методы как наиболее универсальные и апробированные (Krupp-МАС-Метод на основе плазменного реактора; Метод АББ, реализуемый в топке, нагреваемой с помощью контактных электронагревательных элементов; Метод Лусор, разработанного фирмами Лурги и Сорг; Метод КОРМИН и др.).

В [26], например, приводится описание плавильной печи фирмы Europlasma, в которой для переработки твердых остатков, образующихся в процессе термической переработки ТКО, используют плазмотрон. Мощность внедренных этой фирмой установок для переработки твердых остатков (во Франции, Японии и Южной Корее) варьируется от 6 до 41 т/сут. В этой технологии нелетучие минеральные компоненты, в том числе соли тяжелых металлов, извлекаются из печи в виде расплава (вторичного продукта), а образующиеся возгоны летучих веществ (кадмий, ртуть, свинец) после системы сорбции собираются для последующей утилизации.

Методы переработки продуктов газоочистки, предлагаемые отечественными специалистами, изложены, например, в [27–29].

Таким образом, приведенные результаты многолетних отечественных исследований и обобщение мирового опыта свидетельствуют о возможности экологически безопасного с минимальными затратами решения проблем, связанных с переработкой и утилизацией твердых остатков от термической переработки ТКО.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите загрязняющие вещества, для которых в газообразных продуктах сжигания ТКО нормируется их концентрация. К каким стандартным условиям приводятся измеренные в процессе испытаний значения этих величин?

2. Почему на ТЭС на ТКО, как правило, не используют электрофилтры?

3. В чем заключается суть сухих методов очистки дымовых газов от «кислых» вредных составляющих. Какие реагенты используют?

4. Назовите модификации полусухого метода очистки дымовых газов.

5. Какие бывают мокрые скрубберы? Указать преимущества и недостатки очистки дымовых газов с применением скрубберов. Опишите принцип его работы.

6. Какие технологии применяют для снижения выбросов оксидов азота? В чем их отличие? Почему в котлах для сжигания ТКО наиболее часто применяют технологию СНКВ?

7. Назовите мероприятия по снижению выбросов ПХДД/ПХДФ на установках для термической переработки ТКО.

8. Какие твердые остатки образуются в процессе термической переработки ТКО? В чем их отличие?

9. Назовите основные требования к качеству ЗШО для их дальнейшего использования. Какие методы применяют для снижения выщелачивания из ЗШО легко растворимых компонентов?

6. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЭС НА ТКО. ПУТИ СНИЖЕНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ

ТЭС на ТКО, безусловно, является одним из перспективных ВИЭ. В отличие от других видов возобновляемых источников энергии ТЭС на ТКО служит не только для выработки энергии. В результате ее эксплуатации решается важная социальная задача – переработка образующихся в процессе жизнедеятельности человека отходов.

В соответствии с базовыми принципами мировой политики в области обращения с отходами термическая переработка осуществляется в том случае, когда другие, более предпочтительные варианты утилизации ТКО (повторное использование, рециклинг, получение вторичных материальных ресурсов), не возможны или не целесообразны. Энергетическая утилизация ТКО, т.е. термическая переработка отходов с выработкой электрической и тепловой энергии, является основным и завершающим этапом на пути комплексного решения проблемы санитарной очистки населенных пунктов от отходов. В первую очередь, именно этим определяется необходимость создания ТЭС на ТКО. Строительство ТЭС на ТКО только ради энергии бессмысленно. Даже в Европе, где теплота сгорания отходов и цены на энергоносители от ВИЭ выше, выручка от продажи энергии (в виде тепла и электроэнергии) в лучшем случае, покрывает только эксплуатационные расходы ТЭС на ТКО, а доля в общей потребности города в электроэнергии не превышает 5 %. Если не учитывать доходы, получаемые от переработки ТКО, то себестоимость отпускаемой электроэнергии будет намного выше рыночной цены.

Далее показано, при каких условиях эксплуатация ТЭС, основным топливом которой является ТКО, становится экономически оправданной.

6.1. Основные статьи затрат и доходов на ТЭС, сжигающих ТКО

Годовые капитальные затраты ТЭС на ТКО рассчитываются на основе первоначальных инвестиций, требуемой процентной ставки для таких инвестиций (например, 6% в год) и ожидаемого срока службы объекта (например, 15–20 лет). Крупные объекты требуют более высоких аб-

солютных начальных инвестиций по сравнению с ТЭС небольшой производительности, но зато имеют более низкие удельные капитальные затраты на тонну переработанных отходов. Ориентировочные расчеты для ТКО с теплотой сгорания 10 МДж/кг показывают, что увеличение мощности предприятия для термической переработки ТКО в три раза: от 100 до 300 тыс. т ТКО в год, приводит к уменьшению удельных капитальных затрат на 60–70% (рис. 6.1).

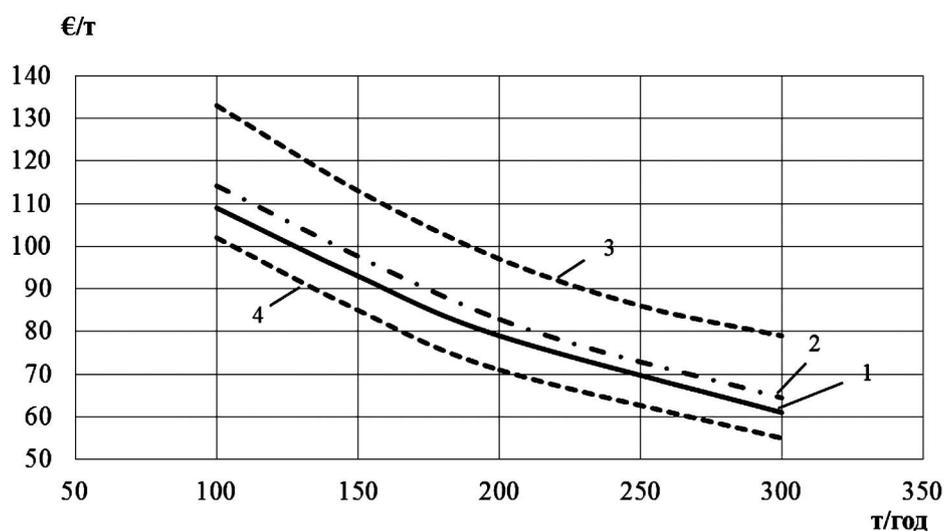


Рис. 6.1. Удельные капитальные затраты на тонну переработанных отходов в зависимости от производительности ТЭС на ТКО и вида отпускаемой энергии:

- 1 – отпуск только тепла; 2 – отпуск электроэнергии;
- 3, 4 – верхний и нижний пределы изменения затрат

На удельные капитальные затраты также оказывает существенное влияние тип отпускаемой потребителю энергии: наименьшие затраты характерны для ТЭС с отпуском только тепла, максимальные – с отпуском только электроэнергии (рис. 6.1).

Создание ТЭС на ТКО с двумя ТЛ приводит к увеличению капитальных затрат примерно на 30–35% по сравнению с ТЭС такой же производительности, но с одной ТЛ. В тоже время, если ТЭС является единственным источником тепловой энергии, например, поставщиком пара на расположенное рядом промышленное предприятие или выручка от продажи электроэнергии зависит от гарантированной поставки ее в городские сети, то вторая ТЛ повышает надежность, как поставок теплоносителей, так и приема ТКО на переработку, что сокращает риск штрафных санкций. Капитальные затраты также зависят от применяемой технологии сжигания и очистки дымовых газов, количества технических резервных систем, стоимости зданий и т.д.

Эксплуатационные затраты связаны в основном с расходами на зарплату персонала, вспомогательные материалы (например, реагенты для очистки дымовых газов), запасные части и техническое обслуживание, страхование и налоги, покупаемую электроэнергию (в случае отпуска только тепла), а также с расходами на утилизацию ЗШО и переработку продуктов газоочистки.

Эксплуатационные расходы на тонну переработанных отходов, также как и удельные капвложения, снижаются по мере увеличения производительности установки, и повышения коэффициента использования установленной мощности. Мировой опыт показывает, что с учетом логистики доставки отходов на ТЭС ее производительность должна быть выше 100 тыс. тонн ТКО в год.

Доходы на ТЭС на ТКО складываются из платы за переработку отходов и от продажи энергии. В свою очередь, доходы от продажи энергии зависят от цен на электроэнергию и технологическое тепло, энергоэффективность завода и теплоты сгорания отходов. Другие доходы, например, от продажи восстановленных материалов (извлеченного металла, продукции из ЗШО) только компенсируют затраты на их получение.

6.2. Оценка влияния вида отпускаемой потребителю энергии на экономические показатели ТЭС, сжигающей ТКО

Всегда ли выгодно преобразовывать энергопотенциал отходов в электроэнергию? С экономической точки зрения на предприятиях для термической переработки ТКО это становится целесообразным, если доходы от продажи электроэнергии покрывают расходы, связанные с дополнительными амортизационными и эксплуатационными затратами на приобретение, установку и обслуживание основного и вспомогательного электрогенерирующего оборудования. В свою очередь, выручка от продажи вырабатываемой ТЭС на ТКО энергии во многом зависит от типа и качества отпускаемой энергии. Так, например, в [1] отмечается, что в Австрии цена электроэнергии составляет 45 €/МВт·час при гарантированном обеспечении ею потребителя, и 25 €/МВт·час, если на поставку электроэнергии влияет режим работы поставщика с возможными перебоями в поставке. Такая же ситуация и с тарифом на отпуск тепловой энергии, который составляет 10 и 6 €/МВт·ч соответственно. Здесь следует еще раз отметить, что гарантированный отпуск тепловой и электрической энергии от предприятия, сжигающего ТКО, (и тем самым повышение цены за ее реализацию), могут быть обеспечены, если в состав ТЭС входят две и более ТЛ или при совместной работе с городской ТЭЦ. В последнем случае, как будет показано в 6.3, также существенно снижаются капитальные и эксплуатационные затраты.

Для каждой конкретной ТЭС на ТКО вид отпускаемой энергии выбирается с учетом установленных тарифов на покупку энергоносителей, законодательства и налогообложения, а также местных условий. Например, если имеется стабильный потребитель тепловой энергии, то часто применяют турбины с противодавлением. Это позволяет, по крайней мере, обеспечивать собственные нужды предприятия в электроэнергии и компенсировать, таким образом, дополнительные затраты, связанные с эксплуатацией электрогенерирующего оборудования. В районах, где отсутствует надежный потребитель тепла, устанавливают небольших конденсационные или паровинтовые турбины, а связанные с их эксплуатацией дополнительные убытки покрывают за счет увеличения тарифа на переработку ТКО. Но все же выработка электроэнергии на этих и других подобных предприятиях, больше исключение, а в общем случае, тип отпускаемой энергии определяется экономической целесообразностью.

Для ТЭС на ТКО, специализирующихся на отпуске только тепловой энергии, нужно иметь в виду еще, по крайней мере, два обстоятельства. Во-первых, необходимо иметь гарантированного потребителя тепловой энергии, особенно в летний период. Во-вторых, при сравнительных оценках следует учитывать затраты на приобретение электроэнергии для собственных нужд (кстати, по рыночным ценам, которые существенно выше закупочных). Собственные нужды на предприятиях, сжигающих ТКО, значительно выше, чем для обычных ТЭС и составляют 20–30% от общего количества электроэнергии, которое теоретически можно было бы выработать, преобразуя энергопотенциал отходов (чем выше годовая производительность предприятия по сжигаемым отходам, тем меньше удельные собственные нужды). Следует также подчеркнуть, что затраты электроэнергии на собственные нужды для предприятий, отпускающих только тепловую энергию, не намного меньше, чем для аналогичного, генерирующего электроэнергию (разница составляет примерно 10%).

Принимая во внимание выше сказанное и воспользовавшись обобщенными зарубежными данными по удельным (на одну тонну переработанных отходов) капитальным и эксплуатационным затратам, непосредственно связанных с энергетической утилизацией ТКО, рассмотрим эффективность получения тепловой и электрической энергии для предприятий разной производительности с учетом следующих условий.

- Продолжительность работы в году 7 500 час
- Средняя теплота сгорания ТКО 7 540 кДж/кг (1 800 ккал/кг)
- Возврат инвестиций по 6% в течение 15 лет.

В расчетах принималось во внимание также следующее:

– Коэффициент использования энергопотенциала ТКО при их сжигании с получением тепловой энергии (например, в виде пара) в основном зависит от КПД котла, который по результатам испытаний, выполненных на московских заводах [1], принимался равным 75%.

– Коэффициент дальнейшего преобразования тепловой энергии (в виде пара) в электрическую зависит, прежде всего, от начальных параметров пара и типа турбины. Для большинства современных ТЭС на ТКО коэффициент преобразования энергопотенциала отходов в электрическую энергию составляет примерно 20%.

– Тариф на покупку энергоносителей у ТЭС на ТКО принимался для двух вариантов: базовый – 25 €/МВт·час за электроэнергию и 6 €/МВт·ч за тепловую энергию и при гарантированном обеспечении потребителя теплоносителем – 45 €/МВт·ч и 10 €/МВт·ч соответственно. Цена, по которой ТЭС покупает электроэнергию на собственные нужды, взята примерно в 1,5 раза больше отпускной цены, установленной в случае гарантированного обеспечения потребителя теплоносителем.

Результаты расчетов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оценка эффективности выработки электрической и тепловой энергии для ТЭС, сжигающих ТКО, с различной годовой производительностью

Производительность, тыс. т ТКО/год	100		200		300	
	тепловая	электрическая	тепловая	электрическая	тепловая	электрическая
Отпускаемая энергия						
Удельные капитальные затраты ¹ , €/т	3,09	8,24	2,32	6,18	2,06	5,49
Удельные эксплуатационные затраты ¹ , €/т	0,9	2,4	0,68	1,8	0,6	1,6
Удельные собственные электрические нужды, МВт·ч/т	0,12	0,13	0,1	0,11	0,08	0,09
Удельные затраты на собственные электрические нужды, €/т	8,11	0	6,76	0	5,4	0
Отдача тепла, МВт·ч/т	1,57	0	1,57	0	1,57	0
Удельная выручка по теплу, €/т	9,4/15,7 ²	0	9,4/15,7 ²	0	9,4/15,7 ²	0
Отдача электроэнергии, МВт·ч/т	0	0,29	0	0,31	0	0,33
Удельная выручка по электроэнергии, €/т	0	7,2/13 ³	0	7,7/13,9 ³	0	8,2/14,8 ³
Общая выручка, €/т	-2,7/3,6 ²	-3,4/2,4 ³	-0,3/5,9 ²	-0,3/5,9 ³	1,4/7,6 ²	1,1/7,7 ³

Примечание: 1) Часть общих затрат, непосредственно связанных с отпуском потребителю тепла или электроэнергии. 2) В числителе выручка при отпуске тепловой энергии по цене 6 €/МВт·ч, а в знаменателе – при цене 10 €/МВт·ч. 3) В числителе выручка при отпуске электроэнергии по цене 25 €/МВт·ч, а в знаменателе – при цене 45 €/МВт·ч.

Из таблицы 6.1 видно, что с экономической точки зрения наиболее эффективна ТЭС производительностью более 300 тыс. т ТКО в год, обеспечивающая надежный отпуск энергоносителей потребителю, т.е., как отмечалось ранее, с двумя ТЛ или более.

В этом случае выручка от продажи энергоносителей примерно одинаково независимо от вида отпускаемой энергии. Но надо иметь ввиду, что найти гарантированного потребителя тепловой энергии, особенно в летний период, весьма проблематично. В этой связи для планируемых к строительству в РФ ТЭС на ТКО следует принять схему с преимущественным отпуском в городские сети электроэнергетики.

6.3. Условия эффективной работы ТЭС на ТКО

В [1] показано, что оптимальная единичная мощность одной ТЛ составляет 180 тыс. т ТКО в год. В этом случае мощностной ряд типовых ТЭС на ТКО для городов с населением 350 тыс. человек и более будет состоять из трех значений: 180,0; 360,0 и 540,0 тыс. т ТКО в год. Как отмечалось ранее, в процессе эксплуатации ТЭС с одной ТЛ возникают экономические риски, связанные со сбоями в приеме отходов и срывами поставок энергоносителей потребителю из-за непредвиденных аварийных ситуаций на единственной ТЛ.

Строительство крупных ТЭС на ТКО (540 тыс. т отходов в год и более) следует рассматривать только для крупных городов (Москва и Санкт-Петербург). Определяющими условиями для их создания будут логистика доставки отходов, экологическое состояние предполагаемого размещения и социальная обстановка в регионе.

По условиям надежности эксплуатации ТЭС в целом и востребованности, наиболее оптимальной представляется ТЭС производительностью 360,0 тыс. т ТКО в год с установленной электрической мощностью 24 МВт. В [1] отмечается о технической возможности и целесообразности строительства 34 таких ТЭС в 22 городах России.

Рассмотрим условия, при которых эксплуатация ТЭС на ТКО будет эффективной.

Капитальные затраты на строительство ТЭС на ТКО распределяются примерно следующим образом, %.

– Оборудование.....	60–65
– Строительно-монтажные работы	25–30
– Проектно-изыскательные работы	3–5
– Пуско-наладочные работы	3–5
– Прочие	3–5

Для определения стоимости основного оборудования ТЭС, ежегодно сжигающей 360,0 тыс. тонн ТКО, с установленной электрической мощностью 24 МВт в год были использованы данные, приведенные в [1]. С учетом индексации и адекватного сравнения с мировыми аналогами стоимость оборудования такой ТЭС составит около 7,7 млрд руб. Тогда общие капитальные затраты будут на уровне 12 млрд руб.

Если принять срок возврата заемных средств 20 лет, то за этот период будет переработано $360\,000 \times 20 = 7,2 \times 10^6$ тонн ТКО. Тогда в общей себестоимости переработки 1 т ТКО затраты на амортизацию составят $12 \times 10^9 / 7,2 \times 10^6 = 1670$ руб./тонну

Годовые производственные издержки (эксплуатационные затраты) включают в себя:

- расходы на дополнительное топливо (природный газ);
- расходы на реагенты газоочистки;
- плата за воду и водоотведение;
- экологические платежи;
- расходы на утилизацию твердых остатков;
- расходы на зарплату персонала;
- расходы по содержанию и эксплуатации оборудования;
- прочие расходы.

Основные эксплуатационные расходы связаны с поддержанием оборудования в рабочем состоянии (60–65%), затратами на приобретение реагентов (примерно 15%) и выплатой зарплаты персоналу (примерно 10%). В отличие от традиционных ТЭС отсутствует значительная статья расходов, связанная с покупкой топлива. Более того, ТЭС на ТКО получает плату за поступающее топливо (отходы), которые термически обезвреживают на этой ТЭС путем сжигания. Как правило, получаемый доход от переработки отходов компенсирует расходы, связанные с возвратом инвестиций (амортизация основных средств и обслуживание заемных обязательств).

Производственные издержки могут покрываться за счет доходов от продажи энергоносителей (электроэнергии) потребителю. За рубежом, где действуют налоговые льготы и «зеленый» (повышенный) тариф на покупку электроэнергии от ВИЭ, почти полностью. Рассмотрим такую возможность в РФ.

Годовые производственные издержки для рассматриваемой ТЭС на ТКО оцениваются примерно 500–700 млн руб., т.е. 1 400–1 900 руб./т (возрастают по мере «старения» оборудования).

Для выработки 1 МВт·ч (3 600 МДж/кг) электроэнергии необходимо сжечь (при КПД 20% и теплоте сгорания отходов 8 000 МДж/т): $3\,600/(8\,000 \times 0,2) = 2,25$ т отходов. Тогда себестоимость вырабатываемой электроэнергии без учета возврата заемных средств будет $2,25 \times 1\,400 = 3\,150$ руб./МВт·ч.

Понятно, что эта себестоимость увеличивается по мере снижения теплоты сгорания отходов и «старения» оборудования (рис. 6.2).

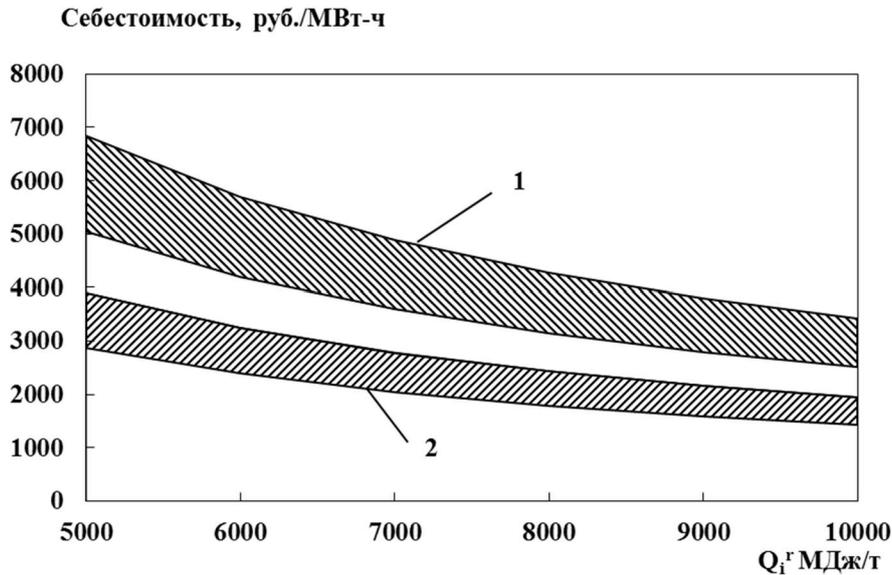


Рис. 6.2. Диапазон изменения себестоимости вырабатываемой электроэнергии в зависимости от производственных издержек и теплоты сгорания сжигаемых отходов (без учета возврата заемных средств):

1 – автономная работа ТЭС на ТКО; 2 – совместно с энергетической ТЭС

В 2020 г. рыночная стоимость электроэнергии, покупаемой у генерирующих компаний, в среднем составляла примерно 2 000 руб./МВт·ч. Цена электроэнергии, отпускаемой потребителю, находилась на уровне 5 000 руб./МВт·ч. Рассмотрим два варианта покупки электроэнергии у ТЭС на ТКО: по рыночной цене и по «зеленому» тарифу, который за рубежом достигает 80% от продажной цены населению и промышленным предприятиям.

При сжигании ТКО с теплотой сгорания 8 000 МДж/т потребителю за вычетом собственных нужд (20%) можно отпустить электроэнергии: $(360 \times 10^3 \times 8\,000 \times 0,2 \times (1 - 0,20))/3\,600 = 1,28 \times 10^5$ МВт·ч.

Тогда доходы от ее продажи составят:

$$1,28 \times 10^5 \times 2\,000 = 2,56 \times 10^8 \text{ руб. (256 млн руб.)}$$

Таким образом, можно компенсировать чуть более 50 % эксплуатационных затрат. В этом случае, безубыточной работы ТЭС на ТКО стоимость приема отходов за их переработку должна быть повышена на $(500 - 256) \times 10^6 / 360 \times 10^3 = 680$ руб./т.

Если появляется возможность продавать электроэнергию по «зеленому» тарифу, то доходы повышаются до $1,28 \times 10^5 \times 0,8 \times 5\,000 = 5,12 \times 10^8$ руб. (512 млн руб.). В этом случае производственные издержки компенсируются практически полностью за счет продажи электроэнергии.

Основной путь снижения капитальных и эксплуатационных затрат, как указано в р. 4.4, – комбинированная работа с энергетической ТЭС. В этом случае капитальные затраты снижаются примерно на 10–15%, а коэффициент преобразования тепловой энергии пара в электроэнергию – повышается. При комбинированной работе этой ТЭС с отпуском пара на энергетическую ТЭС КПД возрастает до 35%

В нашем случае капитальные затраты составят 10,5 млрд руб. Тогда в общей себестоимости переработки 1 т ТКО затраты на амортизацию составляют $10,5 \times 10^9 / 7,2 \times 10^6 = 1\,460$ руб./тонну.

Для выработки 1 МВт·ч электроэнергии необходимо сжечь меньше отходов: $3\,600 / (8\,000 \times 0,35) = 1,29$ т отходов. Соответственно и себестоимость вырабатываемой электроэнергии без учета возврата инвестированного капитала будет ниже: $1,29 \times 1\,400 = 1\,800$ руб./ МВт·ч.

В этом случае практически все эксплуатационные затраты будут компенсироваться за счет продажи электроэнергии, а при продаже по «зеленому» тарифу, кроме того, может быть существенно снижена и цена за прием (переработку) отходов.

Результаты приведенных выше расчетов для двух вариантов: автономная работа ТЭС на ТКО (вариант 1) и совместная с энергетической ТЭС (вариант 2) сведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

**Основные экономические показатели ТЭС на ТКО,
сжигающей 360 тыс. тонн в год, работающей автономно (вариант 1)
и совместно с энергетической ТЭС (вариант 2)**

№ пп	Наименование показателя	Вариант 1	Вариант 2
1	Общие капитальные затраты, млрд. руб.	12	10,5
2	Удельные капитальные затраты, руб./ т ТКО	1 670	1 460
3	Себестоимость выработки электроэнергии при сжигании отходов с $Q_f = 8\,380$ МДж/т, руб./ МВт·ч	3 150*	1 800*
4	Доход от продажи электроэнергии, млн руб./год	256/512**	448/896**
5	Годовые производственные издержки, млн руб.	500	470
6	Себестоимость утилизации ТКО (без учета обслуживания заемных обязательств), руб./т	2 350/1 660**	1 520/280**
* – без учета возврата заемных средств;			
** – в числителе при продаже электроэнергии по рыночной цене, в знаменателе по «зеленому» тарифу			

Таким образом, условия эффективной работы ТЭС на ТКО во многом зависят от теплоты сгорания перерабатываемых отходов и рыночной цены на отпускаемую электроэнергию. Доходы от ее продажи могут покрывать только производственные издержки. А основная и определяющая статья доходов любой ТЭС на ТКО – это плата за переработку отходов.

Контрольные вопросы и задания

1. Что влияет на удельные капитальные затраты ТЭС на ТКО?
2. Из чего складываются доходы на ТЭС на ТКО?
3. Какая минимальная производительность, с экономической точки зрения, наиболее эффективна для ТЭС на ТКО при отпуске потребителю преимущественно электроэнергии?
4. Из чего складываются годовые производственные издержки (эксплуатационные затраты)?
5. Назовите основные пути снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с базовыми принципами мировой политики в области обращения с отходами энергетическая утилизация ТКО осуществляется в том случае, когда другие, более предпочтительные варианты их утилизации (повторное использование, рециклинг, получение вторичных материальных ресурсов), не возможны или не целесообразны.

Под энергетической утилизацией отходов обычно понимают их термическую переработку, в результате которой энергопотенциал отходов преобразуется в тепловую и/или электроэнергию с последующим отпуском этой энергии потребителю. При этом должны соблюдаться определенные критерии. Например, в ЕС термическую переработку ТКО приравнивают к утилизации только в том случае, если энергоэффективность предприятия составляет не менее 0,65.

В этом случае это предприятие по существу является ТЭС, основным топливом которой является ТКО, – ТЭС на ТКО. Ее эффективная работа во многом зависит от теплоты сгорания перерабатываемых отходов, производительности предприятия, выбранной технологии термической переработки ТКО и системы газоочистки, рыночной цены на отпускаемую электроэнергию и от многих других факторов.

В мире накоплен достаточно большой опыт по повышению энергоэффективности предприятий для сжигания ТКО. Целесообразность внедрения тех или иных мероприятий на конкретных установках определяется на основании технико-экономических оценок и местных условий.

Россия не имеет достаточного опыта в области энергетической утилизации ТКО. За все время в стране построено только три завода, которые условно можно считать ТЭС на ТКО. Это введенный в 2001 г. после реконструкции московский спецзавод №2 (МСЗ №2), на котором установлены три турбоагрегата электрической мощностью 1,2 МВт каждый, МСЗ № 4 (год пуска 2005 г., установленная электрическая мощность 12 МВт) и МСЗ № 3 (введен в эксплуатацию в 2007 г., установленная электрическая мощность 11 МВт). Закон № 450–ФЗ, в котором использование ТКО в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) трактуется как энергетическая утилизация, в России вступил в действие только с 01 января 2020 г. Индустрия энергетической утилизации в нашей стране только зарождается. Поэтому не стоит предпринимать попытки достичь на головных отечественных предприятиях европейских значений энергоэффективности. Это приведет к неоправданным экономическим затратам и снижению надежности их работы.

Головные отечественные предприятия для энергетической утилизации ТКО в большинстве случаев будут конденсационными ТЭС с электрическим КПД примерно 20%, на которых будут сжигать отходы с теплотой сгорания 7–9 МДж/кг. Энергоэффективность таких ТЭС на ТКО, как показано в р. 4.5, не превысит 0,45.

Наиболее перспективным для России предприятием для энергетической утилизации ТКО является ТЭС производительностью примерно 360 тыс. т отходов в год, с установленной электрической мощностью 24 МВт. Термическая переработка ТКО на такой ТЭС осуществляется путем их сжигания в слоевой топке на переталкивающей колосниковой решетке с очисткой образующихся газообразных продуктов полусухим методом с многократной циркуляцией золы рукавного фильтра и применением для снижения образования оксидов азота СНКВ.

Экспертные оценки показывают, что с точки зрения санитарной очистки населенных пунктов от ТКО, такая ТЭС может быть востребована, по крайней мере, в 22 городах России. К тому же она идеально подходит для малой распределенной энергетики.

Малая распределенная энергетика – концепция развития энергетики, обеспечивающая возможности перехода от традиционной организации энергетических систем к новым методикам и практикам. Данный переход осуществляется в условиях децентрализации, цифровизации энергетических систем, с использованием различных видов энергетических ресурсов, с целью повышения энергетической эффективности, снижения экологического влияния на окружающую среду.

Малая распределенная энергетика вот уже несколько десятилетий является ведущим трендом развития мировой энергетики и, по оценкам экспертов, данная тенденция сохранится в ближайшее десятилетие. В мире к 2026 г. прогнозируется трехкратный разрыв новых вводов распределенной генерирующей мощности над централизованной (см. рис. ниже).

В России на объекты распределенной генерации на текущий момент приходится около 7% от общего объема выработки электроэнергии. Наиболее развитой составляющей распределенной энергетики в России является распределенная генерация, которая представляет собой энергообъекты мощностью до 25 МВт, расположенные рядом с потребителем.

ТЭС на ТКО может быть одним из таких объектов. Следует напомнить, что твердые коммунальные отходы по теплоте сгорания сопоставимо с торфом и некоторыми марками бурых углей; образуется в местах, где энергия наиболее востребована, т.е. в крупных городах, и имеет гарантированное предсказуемое возобновление, пока существует человечество. Именно поэтому уже сейчас четыре десятка стран официально считают предприятия для термической переработки ТКО с отпуском теплоносителей перспективным возобновляемым источником энергии.



Прогноз ввода новых мощностей централизованной и распределенной генерации в мире (МВт) [30]

ТЭС на ТКО, являясь одним из объектов распределенной генерации, часто подключают к городской тепловой сети. При этом их роль в обеспечении населения теплом существенна. Показательным примером является одна из крупнейших в мире сетей централизованного теплоснабжения Копенгагена, которая простирается более чем 50 км с востока на запад. К сети подключены три завода для термической переработки ТКО. В результате более 30 % от общей потребности в тепле в районе Большого Копенгагена удовлетворяется за счет сжигания отходов. В Париже к сети централизованного теплоснабжения подключены три предприятия (Saint-Ouen, Issy-les-Moulineaux и Ivry Paris XIII). Около 50% потребляемого населением тепла приходится на их долю. Завод в Мальме (Швеция) обеспечивает 60 % потребности города в тепле, а завод Brescia WTE (Италия) — до 75%.

В РФ ежегодно образуется почти 270 млн м³ ТКО, и сейчас практически все они направляются на объекты захоронения. В то же время суммарный энергопотенциал образующихся в России отходов составляет не менее 1,5 ГВт.

Широкомасштабное строительство ТЭС на ТКО в нашей стране позволит решить не только проблему с отходами в крупных городах, но и получить еще один энергообъект малой генерации. Перспективы применения таких ТЭС в распределенной энергетике связаны с обеспечением локальных потребителей электроэнергией (например, экотехнопарков) и их интеграцией в новые и существующие системы теплоснабжения.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. Тугов, А.Н. Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов на ТЭС: монография / А.Н. Тугов. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – 178 с.

Дополнительный

2. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives [Text with EEA relevance] / Official Journal of European Union, November 22, 2008.

3. Мирный, А.Н. Коммунальная экология: Энциклопедический справочник / А.Н. Мирный, Л.С. Скворцов, Е.И. Пупырев и др. – М.: Прима-Пресс-М, 2007. — 808 с.

4. Польшгалов, С.В. Методические подходы к геоэкологической оценке технологий обработки твердых коммунальных отходов с получением твердого топлива: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Польшгалов. – Пермь 2019. – 171 с. – Режим доступа:

<https://pstu.ru/files/2/file/adm/dissertacii/poligalov/Dissertaciya.pdf>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

5. Абрамов, Н.Ф. Отходы мегаполиса: Морфологический и фракционный состав / Н.Ф. Абрамов, С.В. Архипов, М.В. Карелин // Твердые бытовые отходы. – 2009. – №9. – С. 42–45.

6. ГОСТ 2408.3-90 (ИСО 1994-76). Топливо твердое. Методы определения кислорода. – Взамен ГОСТ 2408-3-90; Введ. 01.01.97. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 34 с.

7. Фишо, Ф. Мифы и легенды о биогазе / Ф. Фишо // Твердые бытовые отходы. – 2012. – №2. – С. 22–25.

8. Завизион, Ю.В. Дегазация полигонов захоронения ТКО: проект на полигоне ТКО «Кучино» / Ю.В. Завизион, Н.Н. Слюсарь, Ю.И. Пирогова // Твердые бытовые отходы. – 2019. – №2. – С. 24–31.

9. ГОСТ Р 55127-2012 (CEN/TR 15508:2006) Топливо твердое из бытовых отходов. Основные свойства для составления системы классификации: введен 01.07.2014–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 58 с.

10. Тугов, А.Н. Современные технологии термической переработки ТКО и перспективы их реализации в России (обзор) / А.Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2021. – №1.

11. Сигал, И.Я. Расчет топочных процессов при сжигании твердых бытовых отходов / И.Я. Сигал, В.Б. Жуховицкий, В. Я. Меллер и др. // Экотехнология и ресурсосбережение. – 1997. – № 6. – С.40–47.
12. Yang, Y.B. Converting moving-grate incineration from combustion to gasification –Numerical simulation of the burning characteristics / Y.B. Yang, V.N. Sharifi, J. Swithenbank // Sheffield University Waste Incineration Centre (SUWIC), Department of Chemical and Process Engineering, Sheffield University. – Sheffield, 2006. – 11 p.
13. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on incineration of waste / Official Journal of European Communities, 28.12.2000. – P. 332/91–332/111
14. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод): Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
15. Тугов, А.Н. Не превратить планету в свалку / А.Н. Тугов, Н.Б. Эскин, Д.С. Литун, О.Л. Федоров // Наука и жизнь. — 1998. – № 5. – С. 2–8.
16. Чередниченко, В.С. Современные методы переработки твердых бытовых отходов / В.С. Чередниченко, А.М. Казанов, А.С. Аньшаков и др. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1995. – 55с.
17. Тугов, А.Н. О целесообразности использования плазменных технологий для термической утилизации ТБО / А.Н. Тугов// Твердые бытовые отходы. – 2014. – № 9. – с. 44–47; Твердые бытовые отходы. – 2014. – № 10. – С. 40–44.
18. Батенин, В.М. Термическая утилизация твердых бытовых отходов / В.М. Батенин, В.И. Ковбасюк, Л.Г. Кретьова, Ю.В. Медведев // Теплоэнергетика. – 2011. – № 3. – С. 62–66.
19. Эскин, Н.Б. Анализ различных технологий термической переработки твердых бытовых отходов / Н.Б. Эскин, А.Н. Тугов, А.Н. Хомутский и др. // Энергетик. – 1994. – № 9. – С. 6–8.
20. Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration / European Commission, 2006. – 638 p.
21. Трембовля, В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трембовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – М.: Энергия, 1977. – 296 с.
22. Тугов, А.Н. Опыт использования твердых коммунальных отходов в энергетике (обзор) / А.Н. Тугов // Теплоэнергетика. – 2015. – № 12. – С. 13–22. Doi: 10.1134/S0040363615120127
23. Тугов, А.Н. Методы снижения выбросов диоксинов и фуранов с дымовыми газами на предприятиях, сжигающих твердые бытовые отходы / А.Н. Тугов, В.Ф. Москвичев, Л.Г. Федоров и др. // Электрические станции. – 2008. – № 12. – С. 18–23.

24. Трешлер, Д.Р. Феникс из Флориды / Д.Р. Трешлер // Твердые бытовые отходы. – 2008. – № 6. – С. 64–67.

25. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 4 декабря 2014 года N 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду»: введен в действие с 11 января 2016г., опубликован : Официальный интернет-портал правовой информации: www.pravo.gov.ru, 31.12.2015, N 0001201512310003. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420240163>

26. Бернадинер, М.Н. Высокотемпературная обработка отходов. Плазменные источники энергии / М.Н. Бернадинер, И.М. Бернадинер // Твердые бытовые отходы. – 2011. – №4. – С.16–19.

27. Утилизация золы и шлака мусоросжигательных заводов (в помощь малому бизнесу в области экологии) / О.Ш. Кикава – М.: Издательство «СигналЪ», 2000. – 44 с.

28. Планковский, С.И. Переработка шлаков мусоросжигательных заводов / С.И. Планковский // Твердые бытовые отходы. – 2008. – №6. – С.16–22.

29. Кабанова, Т.С. Экологические проблемы термической переработки твердых бытовых отходов / Т.С. Кабанова, В.А. Зайцев, Г.А. Ягодин // Экология и промышленность России. – 2010. – Февраль. – С. 47–49.

30. Электронный ресурс. — Режим доступа: <https://mks-group.ru/a/raspredeleonnaya-energetika>

Основные термины и определения в области управления отходами

1. Вторичные ресурсы – отходы, в том числе ТКО, пригодные для использования в целях получения сырья, изделий и (или) энергии.

2. Вторичные энергетические ресурсы – отходы, в том числе ТКО, пригодные для использования в целях получения энергии непосредственно или после дополнительной переработки (подготовки).

3. Газоочистное оборудование – устройства для очистки образующихся в процессе термической переработки газообразных продуктов от содержащихся в них твердых частиц и вредных веществ.

4. Захоронение отходов – размещение отходов на полигонах (специальных сооружениях для захоронения отходов, обустроенных и эксплуатируемых в соответствии с требованиями действующего законодательства) или на свалках (местах размещения отходов на территории, не предназначенной и (или) не обустроенной в установленном порядке для размещения отходов).

5. Использование (утилизация) отходов – деятельность, связанная с выполнением технологических процессов по обращению с отходами для обеспечения повторного использования в народном хозяйстве полученных сырья, энергии, изделий и материалов.

6. Котельный агрегат для сжигания ТКО – энерготехнологический котел, включающий в себя топочное устройство и котел-утилизатор.

7. Механическая колосниковая решетка – подовая часть топки, выполненная в виде механизма для транспортировки отходов в топке и выгрузки шлака, непосредственно на котором происходит сжигание ТКО. Применяются следующие типы механических решеток: переталкивающие колосниковые решетки (наклонно-переталкивающие и встречно-переталкивающие); обратно переталкивающие колосниковые решетки и валковые колосниковые решетки.

8. Муниципальные отходы – см. твердые коммунальные отходы.

9. Мусоросжигательный завод, мусоросжигательная установка – устаревшие термины, определяющие предприятие (установку) для термической переработки ТКО с упрощенной системой газоочистки (например, только электрофильтр) и зачастую без утилизации тепла, выделяемого в процессе сжигания. На современных предприятиях для термической переработки ТКО используют наилучшие доступные технологии в области

обращения с отходами. Если при этом в результате энергетической утилизации ТКО потребителю отпускается преимущественно электроэнергия, то такие предприятия уже считаются электростанциями на альтернативном виде топлива (см. также ТЭС на ТКО).

10. Наилучшая доступная технология – технологический процесс, технический метод в области обращения с отходами, основанные на современных достижениях науки и техники, направленные на снижение негативного воздействия на окружающую среду, ресурсо- и энергосбережение, и имеющие установленный срок практического применения с учетом экономических и социальных факторов. В настоящее время наилучшей доступной технологией для термической переработки твердых коммунальных отходов является их (ТКО) энергетическая утилизация с использованием процесса сжигания в слоевых топках на механических колосниковых решетках и в топках с вихревым кипящим слоем.

11. Накопление отходов – временное складирование отходов (на срок не более чем шесть месяцев) в местах (на площадках), обустроенных в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, в целях их дальнейшего использования, обезвреживания, размещения, транспортирования.

12. Норма накопления – количество отходов, образующихся на расчетную единицу (человек – для жилищного фонда; одно место в гостинице; 1 кв. м торговой площади для магазинов и складов и т.д.) в единицу времени (день, год).

13. Обезвреживание отходов – обработка отходов, в том числе термическая переработка, в целях предотвращения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

14. Обращение с отходами – деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, использованию, обезвреживанию, захоронению (размещению) и уничтожению, а также учет и контроль за движением потоков отходов.

15. Отходы потребления – остатки веществ, материалов, предметов, изделий, товаров (продукции или изделий), частично или полностью утративших свои первоначальные потребительские свойства для использования по прямому или косвенному назначению потребления (жизнедеятельности), использования или эксплуатации.

16. Производительность ТЭС на ТКО – Количество перерабатываемых на ТЭС отходов в единицу времени (т/сутки; тыс. т в год).

17. Раздельный (селективный) сбор отходов – вид сбора отходов, предусматривающий в местах сбора и/или накопления отходов разделение отходов согласно определенным критериям на качественно различающиеся составляющие (компоненты, фракции) в виде вторичных ресурсов (текстиль, бумага, стекло, пластик, металл и пр.), компостной фракции (пищевые и растительные отходы) и опасных отходов (отработанные батарейки, ртутьсодержащие лампы и пр.).

18. Санитарно-защитная зона – территория, отделяющая предприятие для термической переработки от жилой застройки, ландшафтно-рекреационной зоны, зоны отдыха, курорта и т. д. для обеспечения снижения уровня воздействия этого предприятия до требуемых гигиенических нормативов по всем факторам воздействия за ее пределами.

19. Сбор отходов – прием или поступление отходов от физических лиц и юридических лиц в целях дальнейшего использования, обезвреживания, транспортирования, размещения таких отходов.

20. Система газоочистки – комплекс мероприятий для обеспечения экологически безопасной для воздушного бассейна термической переработки отходов, включающий в себя технологические мероприятия и газоочистное оборудование. Под технологическими мероприятиями понимают операции, предшествующие процессу термической переработки отходов (например, удаление опасных компонентов таких как батарейки, хлорсодержащие полимеры, аккумуляторы и т.д.), а также мероприятия, осуществляемые в процессе термической переработки (например, при сжигании – это высокотемпературная выдержка продуктов сгорания в течение определенного промежутка времени, подача в топку реагентов и т.д.), в результате которых снижается образование (концентрация) вредных веществ в газообразных продуктах (диоксинов, оксидов азота и серы, тяжелых металлов).

21. Сортировка отходов – обработка отходов, включающая разделение отходов согласно определенным критериям на качественно различающиеся составляющие (стекло, пластик, металл, бумага и пр.).

22. Твердые коммунальные отходы – отходы потребления, образующиеся у населения, а также отходы производства и потребления, производимые предприятиями торговли и сервиса, учреждениями образования и культуры, организациями коммунального комплекса и другими юридическими лицами и индивидуальными предприятиями, осуществляющими свою хозяйственную деятельность на территории населенных пунктов, сходные по составу с твердыми коммунальными отходами.

23. Тепловая эффективность (КПД) котельных агрегатов (установок для термической переработки отходов) – параметр, характеризующий эффективность преобразования энергопотенциала ТКО в тепловую энергию (в виде пара и/или горячей воды). Основу метода определения тепловой эффективности установки составляют балансовые испытания, суть которых заключается в сведении теплового баланса сжигательного и утилизационного оборудования на основе измеренных параметров. Коэффициент полезного действия определяется комбинированным методом – с определением тепловой мощности установки, т.е. теплоты, отведенной рабочей средой (водой и/или паром), и всех тепловых потерь.

24. Термическая переработка – обезвреживание отходов с использованием процессов сжигания, пиролиза, газификации или их комбинацией

25. Технологическая линия – комплекс устройств, предназначенных для термической переработки отходов; очистки образующихся газообразных продуктов и удаления твердых остатков. Под твердыми остатками понимают золошлаковые остатки (шлак и часть летучей золы, удаляемые из устройства для термической переработки отходов и утилизационного оборудования) и твердые продукты газоочистки (оставшаяся часть летучей золы, прореагировавшие и непрореагировавшие реагенты, удаляемые из оборудования газоочистки).

26. Транспортирование отходов – деятельность, связанная с перемещением отходов между местами или объектами их образования, накопления, хранения, использования, обезвреживания, захоронения.

27. ТЭС на ТКО – электростанция, основным топливом которой являются муниципальные отходы (ТКО или приравненные к ним отходы), предназначенная для энергетической утилизации ТКО, т.е. для преобразования энергии отходов, выделяемой в процессе термической переработки отходов, в тепловую и электроэнергию с отпуском потребителю преимущественно электроэнергии. Энергоэффективность ТЭС на ТКО в конденсационном режиме, как правило, должна быть не менее 0,45.

28. Управление отходами – регламентация и регулирование всех процессов, связанных с обращением с отходами, а также реализация мероприятий по уменьшению количества образования отходов.

29. Утилизация отходов – см. использование.

30. Характеристика отходов – свойства отходов, определяющие, прежде всего, морфологический и фракционный состав, теплоту сгорания, зольность, влажность.

31. Экологически безопасное обращение с отходами – отсутствие превышений допустимого риска для окружающей среды со стороны отходов при их сборе, накоплении, транспортировании, использовании, обезвреживании, захоронению (размещению) и уничтожению.

32. Энергетическая утилизация отходов – термическая переработка отходов, в результате которой энергопотенциал отходов преобразуется в тепло и/или электроэнергию для последующего использования этой энергии на собственные нужды и для отпуска потребителю с значением энергоэффективности по п. 34.

33. Энерготехнологическая установка – технологическая линия.

34. Энергоэффективность – параметр, характеризующий процесс энергетической утилизации ТКО. Устанавливает связь между энергией, отпущенной потребителю в виде тепла или электроэнергии; теплотой дополнительного топлива, затраченного на производство энергии; энергией, содержащейся в перерабатываемых отходах, рассчитанной с учетом их теплоты сгорания; импортируемой энергией, получаемой от внешнего поставщика, и т.д. Процесс термической переработки отходов с производством электроэнергии и/или тепла можно считать энергетической утилизацией только в том случае, когда энергоэффективность процесса составляет не менее 0,45 – при отпуске потребителю только электроэнергии и не менее 0,65 – при преимущественном отпуске тепла.

Учебное издание

Тугов Андрей Николаевич

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Учебное пособие

Редактор Д.Р. Чернова

Компьютерная верстка З.Х. Айнетдиновой

Подписано в печать 14.01.21.	Печать цифровая.	Формат 60x84 1/16
Печ. л. 12,25.	Тираж 50 экз.	Изд. № 20у-068
		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.

Для заметок