

MOИ

КНИГА-ПОБЕДИТЕЛЬ
конкурса рукописей учебников
по направлениям подготовки в МЭИ
2022/2023 гг.



II место

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР

Учебник

для студентов, обучающихся по направлению
14.04.01 «Ядерная энергетика и теплофизика»

Под редакцией А.В. Дедова

Москва
Издательство МЭИ
2024

УДК 621.039.6

ББК 31.496

С 34

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

Подготовлено на кафедре общей физики и ядерного синтеза

Рецензенты: А.Н. Романиков, докт. физ.-мат. наук, научный руководитель по плазменным технологиям и УТС АО «ГЦН РФ ТРИНИТИ»;
Ю.С. Шпанский, канд. техн. наук, начальник отдела термоядерных реакторов НИЦ «Курчатовский институт»

Авторы: А.В. Дедов, В.П. Будаев, А.Т. Комов, С.С. Ананьев, А.В. Жиркин, А.В. Захаренков, А.В. Лазукин

С 34 Системы экспериментального термоядерного реактора ИТЭР: учебник / А.В. Дедов, В.П. Будаев, А.Т. Комов и др.; под ред. А.В. Дедова. – М.: Издательство МЭИ, 2024. – 388 с.

ISBN 978-5-7046-2966-5

Приводится историческая справка об идее зарождения управляемого ядерного синтеза и ее осуществлении. Дано описание конструкции токамака как технического устройства для реализации процесса управляемого термоядерного синтеза, в том числе описание международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, его отдельных систем и комплексов, обеспечивающих штатную эксплуатацию.

Для студентов, обучающихся по направлению 14.04.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» (профили подготовки «Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез» и «Термоядерные реакторы и плазменные установки»).

УДК 621.039.6

ББК 31.496

© Коллектив авторов, 2024

ISBN 978-5-7046-2966-5

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
I. Физические основы управляемого термоядерного синтеза	7
Глава 1. Путь от идеи до ее реализации (В.П. Будаев, А.В. Дедов)	7
Глава 2. Токамак (В.П. Будаев).....	18
II. Структура и состав ИТЭР.....	75
Глава 3. Историческая справка (В.П. Будаев).....	75
Глава 4. Разрядная камера (А.В. Захаренков).....	85
Глава 5. Первая стенка, blanket, дивертор, нейтронная защита (А.В. Жиркин).....	100
III. Инженерные системы ИТЭР.....	141
Глава 6. Криовакуумная откачка (А.Т. Комов).....	141
Глава 7. Сверхпроводящая магнитная система (А.Т. Комов)	171
Глава 8. Нагрев плазмы и генерация тока (В.П. Будаев).....	188
Глава 9. Система охлаждения ИТЭР (А.В. Дедов).....	202
Глава 10. Топливный цикл реактора (С.С. Ананьев).....	285
Глава 11. Криогенный комплекс (А.Т. Комов).....	329
Глава 12. Электротехнический комплекс и системы питания (А.В. Лазукин).....	365

ВВЕДЕНИЕ

В России стоит задача масштабной подготовки специалистов инженерно-физического направления для кадрового обеспечения принятой Комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации», включая работы по управляемому термоядерному синтезу, предусматривающие разработку и сооружение экспериментального гибридного термоядерного реактора ТИН – термоядерного источника нейтронов.

Россия участвует в строительстве международного термоядерного экспериментального реактора – ИТЭР, для сооружения и последующей эксплуатации которого необходимо подготовить специалистов. Значительная часть таких специалистов должна быть подготовлена по инженерно-физическим специальностям. В поддержку работ по решению проблемы УТС сооружен токамак Т-15МД, проектируется и планируется сооружение токамака с реакторными технологиями ТРТ, для которых необходимо подготовить специалистов со знанием современных достижений в проектировании систем термоядерной установки. В учебнике изложено развернутое описание инженерии систем ИТЭР и инженерно-физического обоснования всех конструкций и технических решений. Такой учебник будет полезен для подготовки российских инженерных специалистов, которые будут участвовать в сооружении, эксплуатации ИТЭР, ТРТ и Т-15МД, в разработке и сооружении российских термоядерных реакторов – термоядерного реактора ТИН и демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Глава 1. ПУТЬ ОТ ИДЕИ ДО ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Выделение энергии в ядерных реакциях связано с дефектом масс – разницей между суммарной массой свободных нуклонов, из которых состоит ядро, и массой ядра. Энергия связи на один нуклон в ядре имеет зависимость от атомного номера ядра (рис. 1.1).

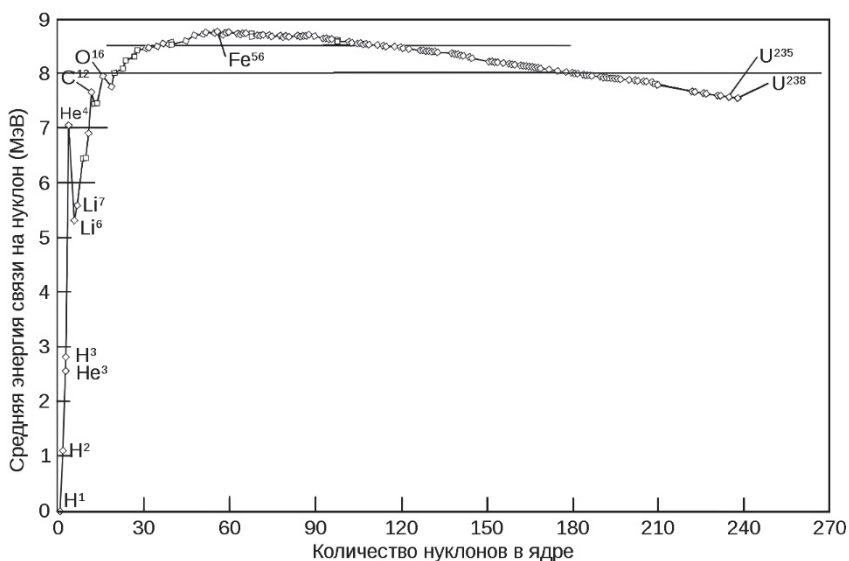


Рис. 1.1. Энергия связи на один нуклон в зависимости от атомного номера ядра

Поэтому при ядерных реакциях происходит либо выделение, либо поглощение энергии. При распаде тяжелых ядер с атомным весом более 57 выделяется энергия. Реакция деления, например, используется в реакторах деления с топливом на основе изотопов урана ²³⁵U и ²³⁸U. В реакциях синтеза (слияния) легких ядер выделение энергии может осуществляться при слиянии ядер с атомным весом до 56. Наиболее выгодные реакции синтеза – с участием ядер изотопов водорода и гелия.

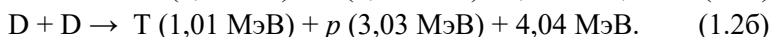
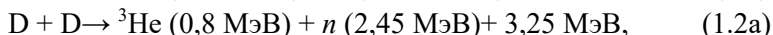
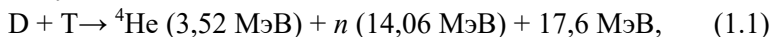
Для реакций синтеза необходимо условие преодоления кулоновского барьера.

В природе ядерные реакции синтеза происходят в звездах, где гравитационное сжатие приводит к разогреву плазмы до высоких температур. Основную часть массы большинства звезд (около 70%) составляет водород, при превращении которого в гелий выделяется большое количество энергии на один нуклон. Два основных пути горения водорода – протон-протонный цикл и CNO-цикл, в которых возможны различные цепочки реакций.

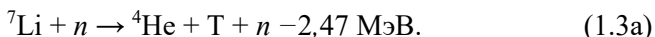
Для звезд массой менее 1,5 от массы Солнца и при температуре в недрах звезды ниже $1,8 \cdot 10^7$ К (1,7 кэВ) основной вклад в энерговыделение вносит протон-протонный цикл. При этом реакция может идти различными путями (цепочки ядерных реакций), но сводится к реакции синтеза протонов p вида $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 3e^+ + 2\nu_e$ с выделением энергии равной 27,3 МэВ, т.е. около 7 МэВ на нуклон. Это относится и к нашему Солнцу, в центральной области которого температура $1,6 \cdot 10^7$ К (1,5 кэВ). Средняя плотность выделяемой мощности в центральной области Солнца относительно небольшая – приблизительно $0,3 \text{ Вт/м}^3$. Более 95% выделяемой при ядерных реакциях энергии излучается с поверхности Солнца в виде потока гамма-квантов.

Для реализации реакций ядерного синтеза в лабораторных условиях необходимы условия преодоления кулоновского барьера, что возможно при достижении взаимодействующими частицами большой кинетической энергии. Такие условия могут быть достигнуты в плазме, нагретой до высокой температуры. Протекающая в таких условиях реакция ядерного синтеза называется термоядерная реакция, и, соответственно, реакторы называются термоядерными.

Представляющие практический интерес реакции ядерного синтеза с участием изотопов легких атомов:



Дейтерий D, изотоп водорода с атомным весом 2, содержится в обычной воде в виде молекул тяжелой воды D₂O в соотношении одна молекула на 6500 молекул воды H₂O с основным изотопом водорода H. Энергия, которую можно извлечь из литра морской воды при «сжигании» находящегося дейтерия в термоядерном реакторе, в 300 раз больше выделяемой энергии при сжигании литра бензина. Запасы дейтерия на Земле практически бесконечны. Тритий T, изотоп водорода с атомным весом 3, нестабилен, радиоактивен с периодом полураспада 12,3 года. В природе его запасы отсутствуют, поэтому его следует производить искусственным способом. Стоит техническая задача создать тритиевую фабрику для обеспечения топливом будущей термоядерный реактор с использованием эффективного источника нейтронов, который будет использовать реакцию лития с быстрыми нейтронами n:

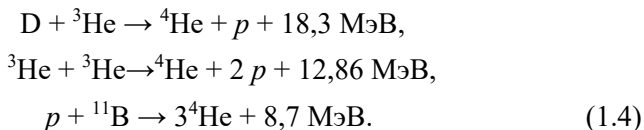


Образовавшийся медленный нейтрон может прореагировать с другим природным изотопом лития с образованием трития:



Запасы лития на Земле огромны, при промышленном освоении этих запасов хватит как на традиционные потребности в этом материале (аккумуляторы, в том числе для электромобилей), так и для использования при производстве трития.

Реакции (1.1) и (1.2) приводят к образованию высокоэнергичных нейтронов, которые будут взаимодействовать с материалами стенки будущего термоядерного реактора. Это будет приводить к образованию радиоактивных элементов, которые образуются во вторичных реакциях с участием термоядерных нейтронов в стенках и компонентах камеры реактора. Поэтому в перспективе необходимо использовать безнейтронные ядерные реакции:



Такие реакции могут протекать при больших температурах плазмы, что является препятствием для практического использования на первом этапе решения проблемы УТС. На Земле отсутствует изотоп гелия ^3He в достаточном объеме для практического использования. Но изотоп ^3He обнаружен на поверхности Луны, что открывает в далекой перспективе благоприятные возможности для термоядерной энергетики.

Для реакции слияния двух ядер им необходимо преодолеть кулоновский (потенциальный) барьер и сблизиться на расстояние $r_0 \sim 10^{-15}$ м, на котором начинают действовать ядерные силы. Величина кулоновского барьера для ядер изотопов водорода $U_0 = e^2/r_0 \sim 1$ МэВ. Эта энергия меньше энергии выделяемой при реакции синтеза (1.1) – (1.2), поэтому такая реакция энергетически выгодна. Сечение реакции имеет максимум в различных диапазонах энергии для реакций (1.1) – (1.4), см. рис. 1.2. Наиболее привлекательной является реакция D–T, для которой максимум сечения $1 \div 5$ барн при энергии в диапазоне $\sim 10 \div 100$ кэВ.

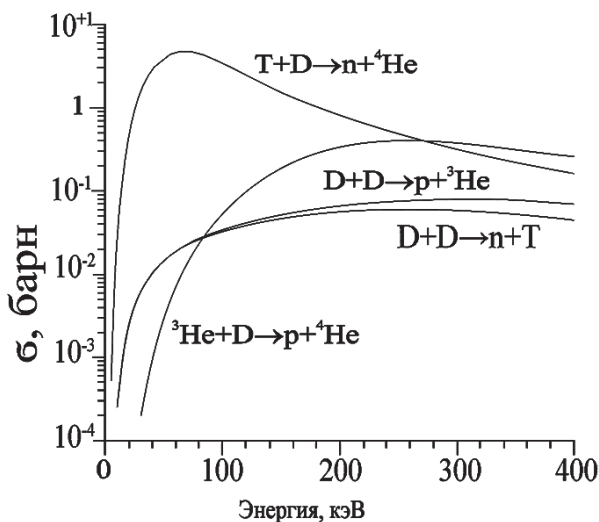


Рис. 1.2. Сечение реакций ядерного синтеза

Из-за квантового эффекта подбарьерного перехода реакция синтеза оказывается возможной при любой энергии сталкивающихся ядер, но скорость реакции зависит от сечения реакции, рис. 1.3. Сечение реакции экспоненциально зависит от энергии при больших энергиях. Даже при кинетической энергии сталкивающихся ядер значительно меньше величины U_0 возможны реакции синтеза (вероятность таких реакций будет крайне мала); например, это наблюдается в ядрах звезд.

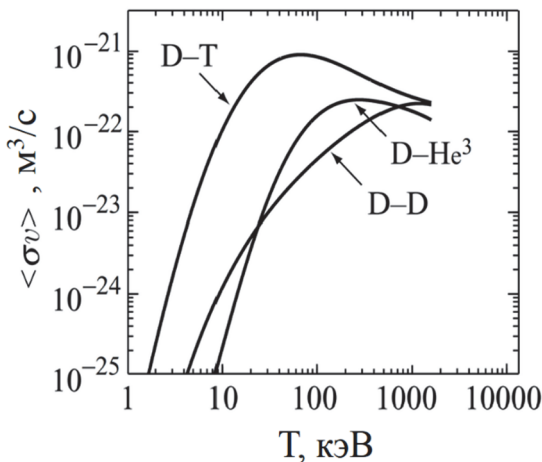


Рис. 1.3. Скорость реакций ядерного синтеза: дейтерий-тритий (D–T), дейтерий-дейтерий (D–D), дейтерий – гелий (D–³He) в зависимости от температуры ионов плазмы

Для практически важной реакции D–T синтеза максимум сечения реакции $\sigma_{DT \max} = 5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2 = 1 \text{ барн}$ приходится на энергию ядра трития $E \sim 10 \text{ кэВ}$. Число реакций в единице объема в единицу времени можно вычислить из сечения реакции. Для равнокомпонентной смеси D и T с концентрацией дейтерия n_D , равного концентрации трития n_T , оно равно $n_D n_T \langle \sigma_{DT} v \rangle$, где угловые скобки означают усреднение по функции распределения ионов дейтерия и трития, а $v = |v_T - v_D|$ – их относительная скорость.

Ввиду квазинейтральности плазмы, концентрация электронов n_e и концентрации ионов в плазме связаны соотношением $n_D = n_T = n_e/2$.

Основной вклад в среднее $\langle\sigma_{DTv}\rangle$ вносят надтепловые частицы с энергией в несколько раз превышающей температуру ионов T_i (в случае максвелловской функции распределения). При максвелловском распределении частиц скорость D–T реакции быстро растет с ростом температуры ионов плазмы до 60 кэВ (рис. 1.3), затем спадает. Для оценки энергетического выхода реакции из объема V необходимо сравнить мощность нагрева плазмы с мощностью полных энергетических потерь из области удержания плазмы (за счет теплопроводности, излучения, диффузии и др.). За единицу времени из единицы объема в результате эффектов потерь из магнитной ловушки теряется мощность, равная $3 \cdot n_e T_i / \tau_E$ (энергию $3/2 T_i$ уносит ион и столько же электрон в предположении равных температур ионов и электронов $T_i = T_e$), τ_E – время удержания энергии в плазменном объеме.

Выделяемая в реакции мощность $P_{\text{яд}} = E_{DT} \cdot n_e^2 \langle\sigma_{DTv}\rangle$, $E_{DT} = 17,6$ МВт. Положительный выход энергии будет достигнут при условии:

$$E_{DT} n_e^2 \langle\sigma_{DTv}\rangle > 3 n_e T_i / \tau_E.$$

Отсюда условие

$$n_e \tau_E > 3 T_i / (E_{DT} \langle\sigma_{DTv}\rangle).$$

Такое условие имеет минимум при энергиях ионов в диапазоне от 10 кэВ до 100 кэВ.

При заданной температуре T_i получается условие для начала самоподдерживающейся реакции при

$$n_e \tau_E = \text{const},$$

которое называется *критерием Лоусона* (называют также *условием Лоусона*).

Для самоподдерживаемой реакции синтеза D–T при практически важной температуре 10 кэВ необходимо, чтобы энерговыделение при реакции скомпенсировало энергетические потери плазмы:

$$n_e \tau_E > 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}.$$

Совместно с условием достижения температуры ионов $T_i = 10$ кэВ рассматривают также расширенное условие Лоусона (тройное произведение):

$$n_e \tau_E T_i = 2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}.$$

Существенным каналом потерь энергии в реакторе является тормозное излучение. Для достижения самоподдерживающейся реакции необходимо компенсировать мощность тормозных потерь $P_{\text{торм}}$, т.е. необходимо чтобы выделяемая мощность $P_{\text{яд}} > P_{\text{торм}}$.

Мощность тормозных потерь $P_{\text{торм}} \sim n_e^2$, а отношение $P_{\text{яд}}/P_{\text{торм}}$ является только функцией температуры T_i . Для реакции D–T условие $P_{\text{яд}}/P_{\text{торм}} > 1$ выполняется при $T_i > 3$ кэВ; при практически требуемой температуре $T_i = 10$ кэВ это отношение равно 60.

Таким образом, для достижения самоподдерживающейся реакции синтеза дейтерия и трития необходимо в термоядерном реакторе:

1) нагреть смесь дейтерия и трития до температуры ионов $T_i = 10$ кэВ или более;

2) обеспечить энергетический баланс горячей зоны реактора, при котором охлаждение плазмы должно компенсироваться внутренним саморазогревом плазмы альфа-частицами (ионами ^4He) – продуктом реакции синтеза.

Для достижения критерия Лоусона возможны два пути: схема инерциального синтеза и схема с магнитным удержанием плазмы.

При реализации инерциального синтеза большая плотность плазмы обеспечивается путем сжатия плазмы, при этом нет необходимости удерживать плазму большое время. Схема инерциального синтеза, используется при неконтролируемой термоядерной реакции (водородная бомба), где большая плотность и температура плазмы достигается импульсным обжатием топливной дейтерий-тритиевой мишени. Для целей управляемого инерциального ядерного синтеза используется импульсное обжатие мишеней из дейтерий-тритиевой смеси в установках с использованием лазерных систем и в Z-пинчах.

При магнитном удержании плазмы можно не добиваться большой плотности плазмы, но необходимо удерживать плазму достаточно долго и эффективно, чтобы обеспечить выполнение критерия Лоусона и достичь длительного времени удержания энергии в плазменном объеме.

Такая схема управляемого термоядерного синтеза рассматривается для создания термоядерного реактора, в том числе в первом термоядерном реакторе ИТЭР. В ИТЭР планируется достичь энергетическое время удержания $\tau_E = 3,7$ с при средней концентрации электронов в дейтерий-тритиевой плазме $n_e = 1,01 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в зоне термоядерной реакции, т.е. достичь параметров, удовлетворяющих критерию Лоусона.

Идею магнитного удержания плазмы для достижения условий реакции ядерного синтеза в 1951 г. выдвинули наши выдающиеся ученые А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм (их фото на рис. 1.4).



Рис. 1.4. Игорь Евгеньевич Тамм и Андрей Дмитриевич Сахаров

Была предложена схема с сильным магнитным полем – магнитная ловушка, в которой удерживается горячая плазма. Заряженные частицы плазмы в сильном магнитном поле движутся по винтовым траекториям вдоль магнитных линий, радиус винтовой

траектории (ларморовский радиус) обратно пропорционально зависит от магнитного поля. Таким образом, движение частиц поперек магнитного поля ограничено. Если создать геометрию магнитного поля с благоприятной конфигурацией, то можно достичь удержание плазмы в ограниченном объеме в течение длительного времени.

Задача состоит в достижении критерия Лоусона. Были предложены несколько типов магнитных ловушек: магнитные ловушки с тороидальной геометрией – токамаки, стеллараторы, тороидальные пинчи, линейные магнитные системы. Начиная с 1950-х гг. проводятся экспериментальные исследования удержания плазмы в магнитных ловушках с различной топологией магнитного поля с целью достичь условий зажигания термоядерной реакции. Наиболее успешной оказалась схема токамака (см. следующую главу).

Нарушать удержание плазмы в магнитной ловушке могут эффекты диффузии плазмы поперек магнитного поля, вызванные столкновениями и развитием нестабильных движений плазмы – неустойчивостей. Возникающие неустойчивости являются причиной значительных потерь плазмы из магнитных ловушек. Для развития методов подавления или ограничения неустойчивостей и повышения эффективности удержания плазмы в магнитных ловушках в течение последних десятилетий проведены многочисленные экспериментальные исследования, которые позволили предложить схему магнитного удержания плазмы для реализации управляемого термоядерного синтеза – интернациональный термоядерный экспериментальный токамак-реактор ИТЭР (ITER – *International Thermonuclear Experimental Reactor*). Международный проект ИТЭР осуществляется с участием ведущих технологически развитых государств, включая Россию, для проверки достижения управляемого термоядерного синтеза и дальнейшего развития термоядерных технологий.

Используя схему магнитного удержания плазмы и результаты экспериментальных исследований на ИТЭР, планируется разработать проекты термоядерной электростанции (ДЕМО и др.) на основе дейтерий-тритиевой реакции ядерного синтеза, рис. 1.5.

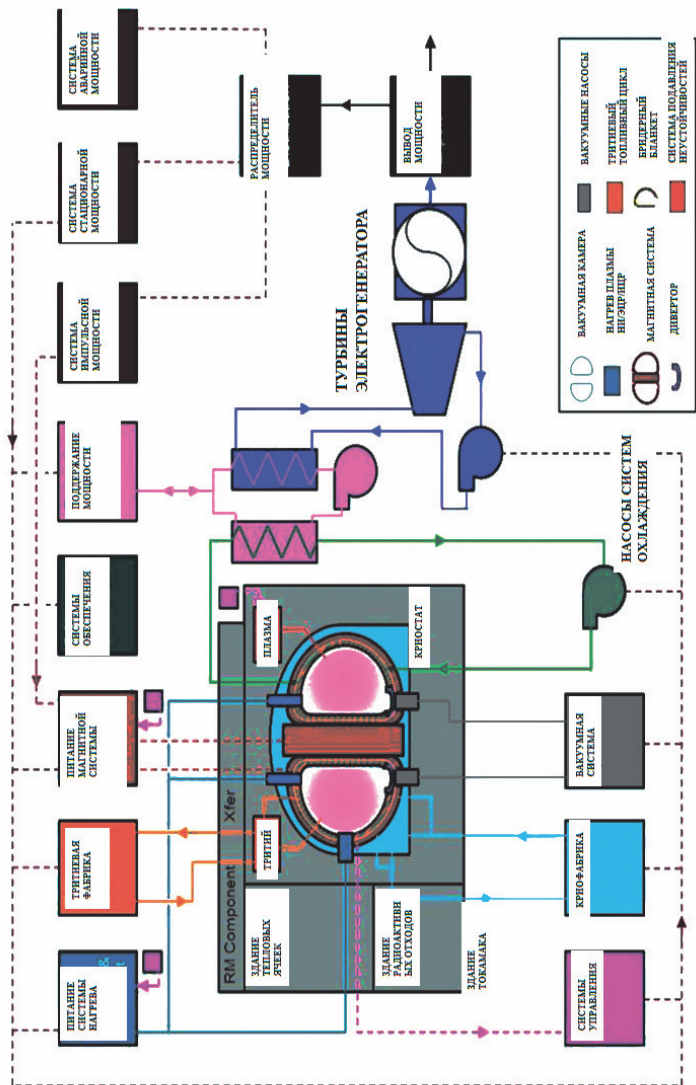


Рис. 1.5. Схема термоядерной электростанции ДЕМО с использованием дейтерий-тритиевой реакции ядерного синтеза в горячей плазме

Контрольные вопросы и задания

1. С каким эффектом связано выделение энергии в ядерных реакциях?
2. Какие реакции ядерного синтеза являются перспективными для достижения управляемого термоядерного синтеза?
3. Назовите условия, необходимые для реализации реакций ядерного синтеза в лабораторных условиях.
4. Какие запасы топлива на Земле для использования реакции ядерного синтеза в термоядерной энергетике?
5. Какая температура плазмы должна быть достигнута в термоядерном реакторе с использованием реакции синтеза дейтерия и трития?
6. Какой критерий используется для достижения самоподдерживающейся дейтерий-тритиевой реакции синтеза?
7. Какие продукты получаются в дейтерий-тритиевой реакции синтеза?
8. Какие каналы потерь энергии в термоядерном реакторе являются наиболее существенными?
9. Назовите возможные пути для достижения критерия Лоусона.
10. Опишите схему инерциального синтеза.
11. Кто впервые предложил метод магнитного удержания плазмы для достижения реакции ядерного синтеза?
12. Какое время удержания энергии и концентрация плазмы планируется достичь в первом термоядерном реакторе ИТЭР?
13. Какие эффекты могут нарушать удержание плазмы в магнитной ловушке?
14. Опишите схему магнитного удержания плазмы, используемую для реализации управляемого термоядерного синтеза в международном термоядерном экспериментальном реакторе ИТЭР.
15. Опишите схему магнитного удержания плазмы, рассматриваемую для развития проекта термоядерной электростанции ДЕМО.

Список рекомендуемой литературы

1. Арцимович, Л.А. Управляемые термоядерные реакции / Л.А. Арцимович. – М.: Физматлит, 1963.
2. Мирнов, С.В. Энергия из воды / С.В. Мирнов. – М.: МИФИ, 2008.
3. Основы проектирования магнитного термоядерного реактора / под ред. В.А. Глухих и Г.Л. Саксаганского. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016.

ГЛАВА 2. ТОКАМАК

2.1. Схема токамака

В 1951 г. Игорь Евгеньевич Тамм и Андрей Дмитриевич Сахаров предложили схему токамака и разработали теоретические основы магнитного термоядерного реактора. Несколько лет спустя Игорь Николаевич Головин придумал ему название – ТОКАМАК как сокращение от слов ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками. Это название используется во всем мире. Первый токамак Т-1 был построен в 1955 г. в СССР в Институте атомной энергии (ныне – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»), рис. 2.1, и долгое время токамаки существовали только в СССР.

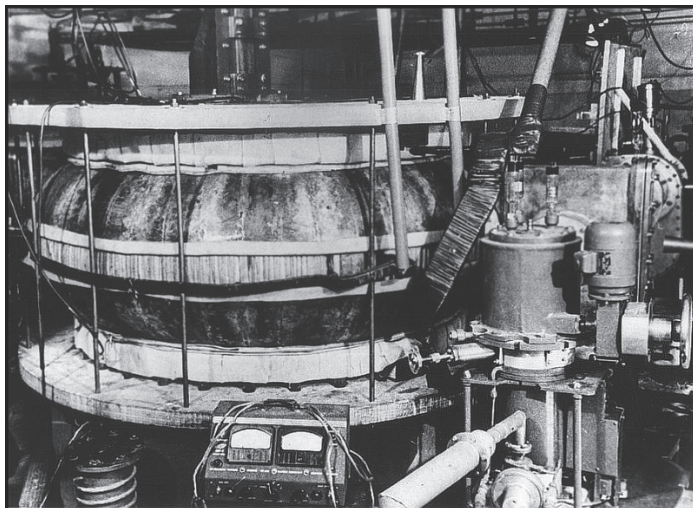


Рис. 2.1. Первый токамак Т-1 с вакуумной камерой из меди, объем плазмы – $0,4 \text{ м}^3$, построен в СССР в Институте атомной энергии

Лишь после 1968 г., когда английские ученые своей аппаратурой измерили температуру плазмы на токамаке Т-3, построенном в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова под руководством Льва Андреевича Арцимовича (фото на рис. 2.2), и подтвердили, что

там достигнута температура 1 кэВ (11 млн градусов), в мире начался настоящий бум токамаков. За все время исследований было построено более 300 токамаков.



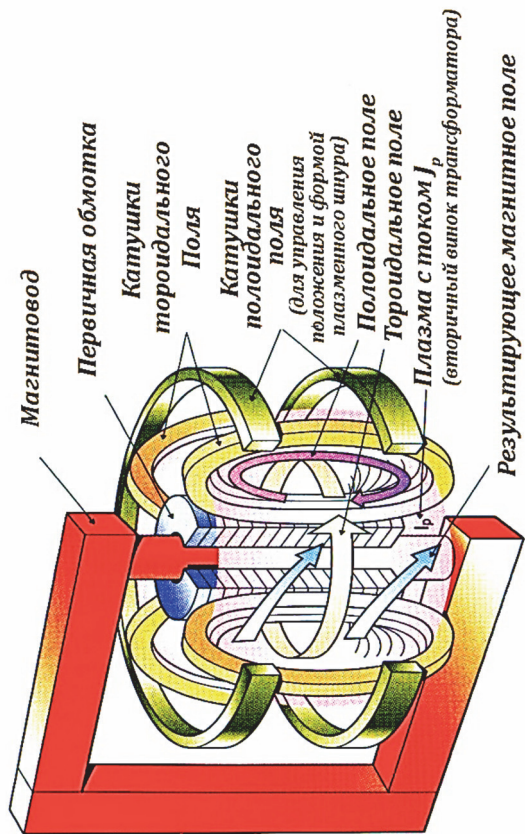
Рис. 2.2. Лев Андреевич Арцимович

Токамаки являются осесимметричными магнитными ловушками плазмы с тороидальной геометрией плазменного разряда. Плазма генерируется и удерживается в тороидальной вакуумной камере из нержавеющей стали. Основное магнитное поле вдоль оси тора (называемое тороидальным) создается катушками, установленными поверх вакуумной камеры. Токамак имеет также катушки вертикального магнитного поля для формирования диверторной конфигурации и обеспечения равновесия, катушка для создания тока плазмы – индуктор, см. схему современного токамака на рис. 2.3а. Используются внешние источники питания для подачи тока в магнитные катушки токамака.

Первоначально были построены токамаки с круглым сечением плазмы. Затем была предложена схема с дивертором, где плазма имеет вытянутую в вертикальном направлении форму (ее предложил Виталий Дмитриевич Шафранов с коллегами), которая формируется дополнительными магнитными полями. Диверторная конфигурация имеет ряд преимуществ, которые были подтверждены в экспериментах на крупных токамаках.

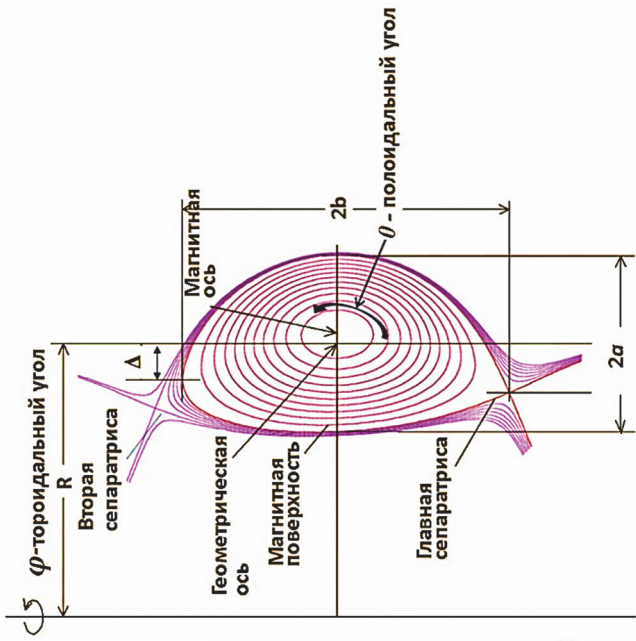
Для стабилизации плазменного разряда в токамаке величина индукции тороидального магнитного поля должна быть достаточно большой, в современных крупных токамаках она достигает 5 Тесла и более. Длительное время использовались катушки, изготовленные из медных охлаждаемых проводников. Начиная с экспериментов на токамаке Т-7 (ИАЭ, СССР, 1979 г.) стали использовать катушки из сверхпроводника. Современные токамаки используют сверхпроводящие магнитные катушки (токамаки EAST в Китае, WEST в Европе, KSTAR в Корее, JT-60SA в Японии и другие). В ИТЭР и будущих термоядерных реакторах будут использоваться сверхпроводящие магнитные катушки. Для генерации и нагрева плазмы в токамаке используется схема трансформатора. Магнитный поток, индуцируемый первичными обмотками трансформатора (индуктора), создает вихревое тороидальное электрическое поле для генерации тороидального тока в плазме. Генерируемый таким способом ток нагревает плазму и создает аксиальное магнитное поле (называемое полоидальным магнитным полем), необходимое для равновесия тороидальной плазмы. Во многих построенных ранее токамаках трансформатор тока выполнен с использованием железного магнитопровода (сердечника), например, в токамаке Т-10. В современных токамаках также используются системы генерации тока со схемой воздушного трансформатора.

Результирующее магнитное поле, создаваемое катушками тороидального магнитного поля и током в плазме, имеет винтовую структуру – силовые линии магнитного поля при обходе вдоль тора вращаются и по полоидальному обходу (рис. 2.3б). Такая винтовая структура магнитного поля обеспечивает свободное перетекание вдоль магнитного поля ионов и электронов между верхней и нижней зоной тороидального разряда, что компенсирует вертикальное разделение зарядов из-за градиентного дрейфа плазмы в тороидальном магнитном поле. Магнитная структура состоит из вложенных тороидальных магнитных поверхностей, такая структура обеспечивает удержание частиц на этих магнитных поверхностях, а также постоянное давление плазмы на магнитных поверхностях; в результате обеспечивается равновесие плазмы в такой магнитной структуре (рис. 2.3в).

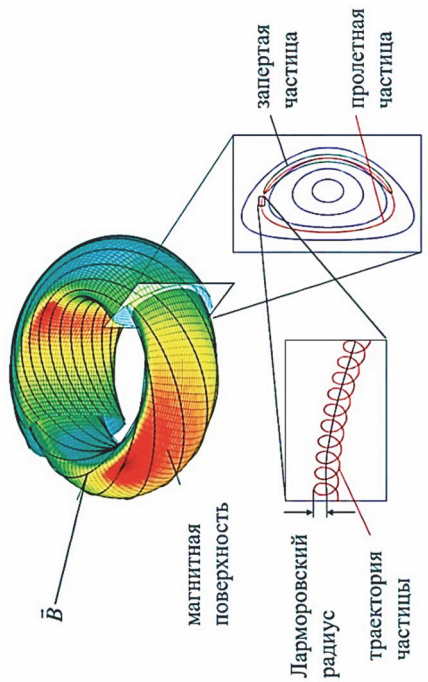


a)

Рис. 2.3. Конфигурация катушек магнитного поля современного токамака с дивертором (а); магнитная структура токамака и траектории движения частиц в магнитном поле (б); полюoidalное сечение токамака и тороидальная система координат, θ – полюoidalный угол, ϕ – тороидальный угол (в)



в)



б)

Окончание рис. 2.3

Вакуумная камера токамака обычно изготавливается из тонкой нержавеющей стали, чтобы она имела достаточное электрическое сопротивление – значительно больше сопротивления плазменного витка. В таких условиях трансформируемый ток в тороидальном направлении преимущественно протекает по плазме, а не по стенке камеры. Внутри вакуумной камеры монтируются дополнительные пластины и элементы, ограничивающие контакт горячей плазмы со стенкой камеры. Такие элементы изготовлены из тугоплавких металлов и термостойких материалов и выступают в качестве теплозащитных элементов стенки от потоков горячей плазмы. Такими внутрикамерными элементами могут быть диафрагмы (называемые также лимитерами) из вольфрама, молибдена или графита, которые ограничивают размер плазмы и сводят к минимуму взаимодействие плазмы со стенкой вакуумной камеры. Кроме того, используется магнитная конфигурация с дивертором, так что последняя замкнутая магнитная поверхность (сепаратриса) определяет границу плазмы, отделяемую основную зону плазменного разряда от диверторного объема. Для стабилизации магнитогидродинамических неустойчивостей и вертикального смещения применяются вертикальные магнитные поля, создаваемые дополнительными обмотками. Величина дополнительного магнитного поля регулируется с использованием обратной связи от датчиков вертикального смещения, чтобы плазма всегда находилась в центре вакуумной камеры. За годы экспериментов, начиная с первых токамаков, в схему токамака было внесено множество улучшений, включая создание диверторной конфигурации, теплозащитные облицовки разрядной вакуумной камеры, дополнительные обмотки управления положением плазменного разряда и подавления неустойчивостей, в том числе ЭЛМов – неустойчивостей краевой плазмы, приводящих к мощным импульсным потокам плазмы на стенку.

Схема проведения экспериментов на токамаке

Для проведения экспериментов вакуумная камера токамака откачивается с помощью вакуумных насосов, в камере достигается давление менее 10^{-6} Торр. Вакуумная откачка камеры токамака осуществляется непрерывно в течение проведения серии

экспериментов. Обычно это может длиться многие дни и даже месяцы, что позволяет достичь благоприятных вакуумных условий. Для минимизации поступления примесей со стенки камеры перед экспериментами вакуумную камеру дегазируют путем прогрева при температуре в диапазоне $120\div 300^{\circ}\text{C}$ в течение длительного времени (несколько десятков часов) в условиях высокого вакуума. Выделяемые при прогреве камеры газы удаляются системой вакуумной откачки. Кроме того, перед проведением эксперимента для очистки поверхности стенки вакуумной камеры применяют тлеющий плазменный разряд либо в классической схеме, либо в слабом тороидальном магнитном поле (так называемый Тэйлоровский разряд).

При готовности камеры и всех систем токамака к проведению эксперимента выполняется последовательность включения систем токамака. Для зажигания плазменного разряда в камеру токамака подают рабочий газ (обычно водород или дейтерий, в реакторных экспериментах подается смесь дейтерия и трития), достигая давление в камере около 10^{-4} Торр (в зависимости от программы эксперимента). В течение плазменного разряда давление напускаемого рабочего газа может регулироваться в зависимости от программы эксперимента и условий протекания разряда.

После напуска в вакуумную камеру рабочего газа включаются системы питания тороидального магнитного поля, индуктора и полоидального магнитного поля, а также другие системы обеспечения (управления, диагностики и пр.). Вихревое тороидальное электрическое поле (генерируемое индуктором) формирует условия разрядного пробоя в газе в камере. При необходимости для пробоя газа дополнительно используют также специальные методы (ионизацию высокочастотными волнами, предварительную ионизацию газа ультрафиолетовым облучением, использование дополнительных витков индуктора). После пробоя газа в камере развивается тороидальный ток, поддерживаемый индуктором. Такой ток (называемый омическим током), протекая

по плазме, нагревает ее. Поскольку магнитный поток в магнитопроводе трансформатора зависит от сечения магнитопровода, то технические характеристики индуктора определяют длительность протекания однополярного тока в плазме, а значит и длительность плазменного разряда. В построенных токамаках длительность разряда была от долей секунд до нескольких секунд, а в современных токамаках достигнута длительность разряда от десятков секунд до тысячи секунд (табл. 2.1).

Для увеличения длительности разряда более, чем позволяет индуктор, в современных токамаках применяются дополнительные методы генерации тока с помощью высокочастотных генераторов. Техническая реализация такого метода требует углубленного знания физики поглощения плазмой энергии ВЧ волн в токамаке, тщательный контроль состояния плазменного разряда для эффективности генерации тока в плазме. Такие методы поддержания дополнительного тока имеют решающее значение для разработки промышленного термоядерного реактора, для которого требуется стационарный режим работы в течение многих часов.

Плазма с током удерживается тороидальным магнитным полем. Обычно величина тороидального магнитного поля поддерживается постоянной в течение всей длительности разряда. При использовании обычных магнитных систем с медными катушками ток в них поддерживается включением системы питания на период плазменного разряда, включение питания происходит заранее для введения тока в катушки до начала плазменного разряда. При использовании сверхпроводящих катушек магнитного поля в современных токамаках магнитное поле поддерживается постоянно длительное время – многие дни и месяцы.

Для устойчивости плазменного витка относительно вертикальных смещений и для создания удлиненной формы плазмы используются магнитные поля, создаваемые дополнительными катушками.

Завершение плазменного разряда достигается обычно из-за прекращения тока в плазме, связанного с техническими ограничениями индуктора при отсутствии систем поддержания дополнительного тока. Используют также методы управляемого прекращения плазменного разряда путем прекращения тока в катушках магнитного поля, отключения подачи рабочего газа и отключения других систем токамака. Прекращение разряда может наступить при развитии неустойчивости срыва – наиболее опасной неустойчивости в токамаке.

Конфигурация современного токамака с дивертором имеет сложную трехмерную структуру. Магнитная структура токамака имеет сепаратрису (обычно с X-точкой в нижней части камеры), также может быть создана конфигурация с двумя сепаратрисами (см. рис. 2.3). Сепаратриса отделяет внутренние замкнутые магнитные поверхности от периферийных магнитных силовых линий (называемых открытыми магнитными линиями), которые внутри камеры утыкаются в поверхности материальных пластин дивертора и стенки. Эллиптичность $k_s = b/a$, треугольность $\delta = \Delta/a$ характеризуют форму полоидального сечения последней замкнутой магнитной поверхности (ПЗМП, LCFS – *Last Closed Flux Surface*).

Для более подробного описания сложной геометрии токамака используют следующие характеристики:

R_{\max} – максимум величины R вдоль ПЗМП или сепаратрисы;

R_{\min} – минимум величины R вдоль ПЗМП или сепаратрисы;

R_{geo} – геометрический большой радиус, определяемый как $(R_{\max} + R_{\min})/2$;

a – малый радиус, определяемый как $(R_{\max} - R_{\min})/2$;

R_{upper} – большой радиус высшей точки ПЗМП или сепаратрисы;

R_{lower} – большой радиус нижней точки ПЗМП или сепаратрисы;

Верхняя треугольность определяется как

$$\delta_{upper} = (R_{geo} - R_{upper})/a,$$

и также определяется нижняя треугольность δ_{lower} . Средняя треугольность определяется как среднее от δ_{upper} и δ_{lower} .

Магнитная конфигурация периферийной (называемой также диверторной и пристеночной) зоны играет существенную роль в физике удержания плазмы в магнитной ловушке токамака. Именно вдоль периферийных магнитных линий электроны и ионы из всего плазменного разряда протекают, в конечном итоге, на стенку камеры – границу плазменного разряда. Физика протекания заряженных частиц плазмы вдоль магнитных силовых линий на материальные поверхности дивертора и стенки камеры не определяется только простейшим механизмом столкновительной диффузии. Определяющую роль в переносе заряженных частиц плазмы из разряда на поверхность играют самосогласованные электрические поля и токи, формируемые в приповерхностном слое на микронных масштабах порядка дебаевского радиуса и временах, определяемых плазменной частотой.

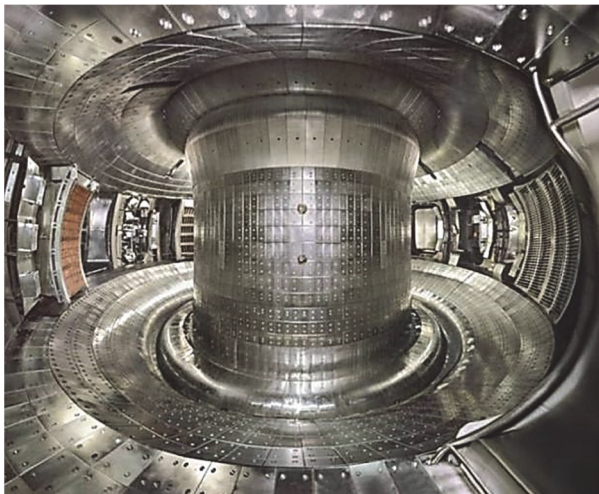
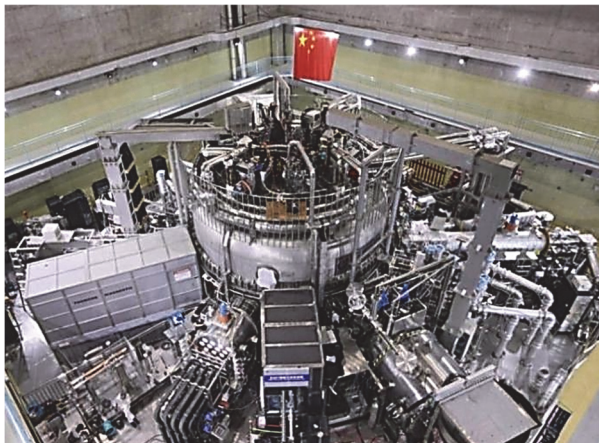
Параметры некоторых построенных токамаков и характеристики плазмы в них перечислены в табл. 2.1. В современных токамаках достигнут значительный прогресс как в длительности разряда, так и в параметрах плазмы. На рисунке 2.4 показаны схемы некоторых токамаков, а на рис. 2.5 достигнутые параметры плазмы. На токамаках TFTR и JET в 1990-х гг. проведены эксперименты с дейтерий-тритиевой смесью, в которых достигнуты условия протекания термоядерной реакции. В токамаке EAST в 2021 г. достигнута длительность плазменного разряда более 1000 с, что соответствует реакторным временам. В России сооружен токамак Т-15МД в НИЦ «Курчатовский институт». Достижения в экспериментах на токамаках, в том числе результаты, которые ожидается получить в экспериментах на ИТЭР, являются основанием для проектирования и строительства термоядерного реактора следующего поколения.

Таблица 2.1

**Параметры некоторых построенных токамаков:
 большой радиус R , малый радиус a , вертикальный
 малый радиус b в диверторном токамаке,
 тороидальное магнитное поле B_t , ток плазмы I_p**

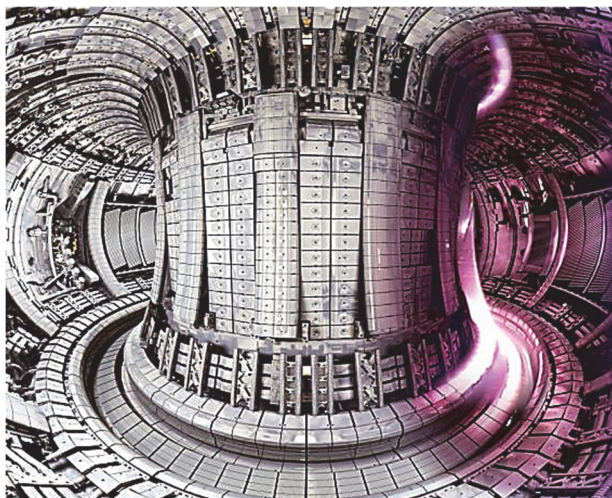
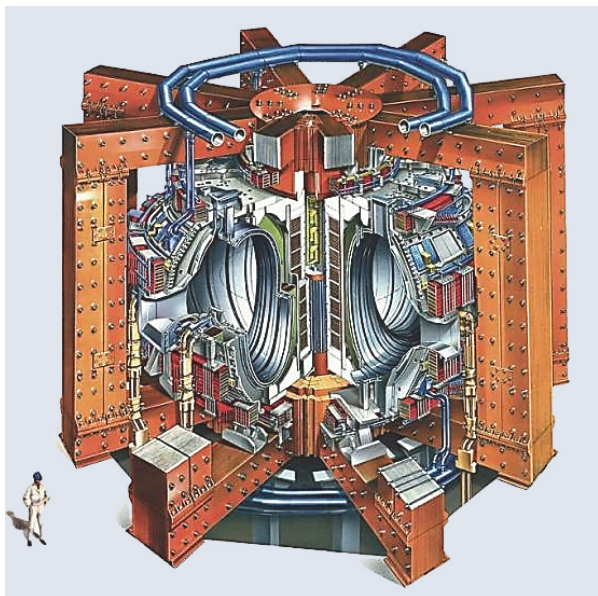
Токамак, страна	Большой радиус R , м	Малый радиус a (b), м	Аспектное отношение R/a	Тороидальное магнитное поле B_t , Тл	Ток плазмы I_p , МА	Особенности
Т-4, СССР	1,0	0,17	5,9	5,0	0,3	Круглый токамак, впервые получены термоядерные нейтроны
Т-7, СССР	1,7	0,4	4,25	3,5	1	Впервые создана сверхпроводящая магнитная система из сплава ниобий–олово
Т-10, Россия	1,5	0,39	3,8	5,0	0,3	Круглый токамак, впервые создан мощный комплекс гиротронов для ЭЦРН
ASDEX, Германия	1,65	0,5(0,8)	3,3	3,1	2	Диверторный токамак, открыта Н-мода
D-III-D, США	1,67	0,67	2,5	2,2	2,0	Диверторный токамак
TFTR, США	2,48	0,85	2,9	5,2	2,5	Круглый токамак, проведены ДТ эксперименты
JET, ЕС	2,96	1,25(2,1)	2,4	3,45	7	Самый крупный диверторный токамак, проведены ДТ эксперименты

Токамак, страна	Большой радиус R , м	Малый радиус a (b), м	Аспектное отношение R/a	Тороидальное магнитное поле B_t , Тл	Ток плазмы I_p , МА	Особенности
KSTAR, Корея	1,8	0,5 (2)	3,6	3,5	2,0	Диверторный токамак, сверхпроводящая магнитная система
EAST, КНР	1,85	0,45 (0,7)	4,1	3,5	2,0	Диверторный токамак, сверхпроводящая магнитная система, получен разряд длительностью 1000 с
WEST, Евросоюз	2,5	0,5 (0,7)	5	3,7	1,	Диверторный токамак, модернизация сверхпроводящего токамака Tore Supra. Вольфрамовая облицовка камеры
JT-60SA, Япония	2,96	1,18 (3,5)	2,5	2,25	5,5	Диверторный токамак. Сверхпроводящая магнитная система, модернизация токамака JT-60
SST-1, Индия	1,1	0,2 (0,36)	5,5	3,0	0,22	Диверторный токамак. Сверхпроводящая магнитная система
T-15МД, Россия	1,48	0,67 (1,27)	2,2	2,0	2	Диверторный токамак, малое аспектное отношение



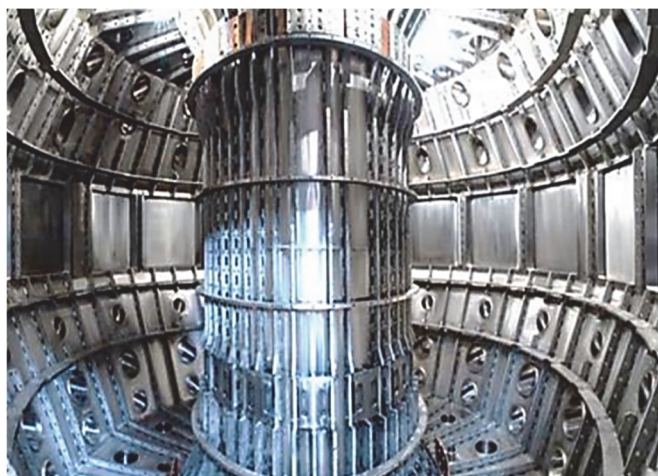
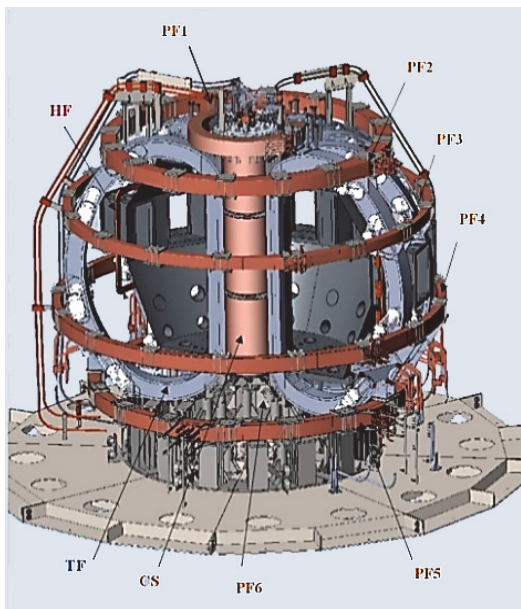
а)

Рис. 2.4. Токамак EAST, Китайская Народная Республика:
общий вид и камера токамака (а);
Токамак JET, Европейский союз:
схема и композиционное изображение вакуумной камеры (б);
Токамак Т-15МД, Россия: схема и камера токамака (в)



б)

Продолжение рис. 2.4



в)

Окончание рис. 2.4

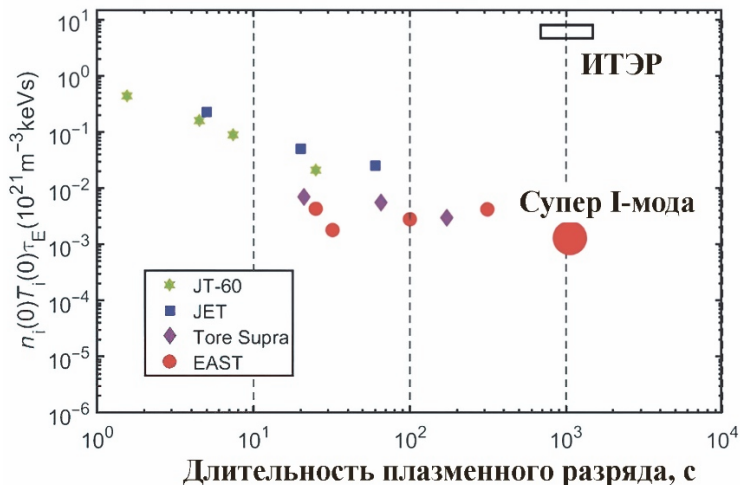


Рис. 2.5. Достижения параметров плазмы (тройное произведение параметров концентрации ионов $n_i(0)$ и температуры ионов $T_i(0)$ в центре камеры и времени удержания энергии τ_E), и длительности плазменного разряда в экспериментах на крупных токамаках и ожидаемые результаты ИТЭР

Диагностики токамака

Для управления и исследования плазмы в токамаке необходимы специальные диагностики. Условно их можно разделить на две группы:

- рабочие диагностики, необходимые для формирования и контроля стабильного плазменного разряда;
- диагностики для исследования физики плазмы в токамаке.

Измерение основных параметров плазменного разряда проводится с использованием магнитных зондов и диагностических витков, устанавливаемых внутри вакуумной разрядной камеры либо на ней, что позволяет измерять ток плазмы и проводить диагностику МГД явлений в разряде. На рисунке 2.6 показано расположение используемых зондов в токамаке. Сигналы магнитных зондов также используются для управления в системах обратной связи для подачи тока в управляющие обмотки с целью контроля поведения плазмы.

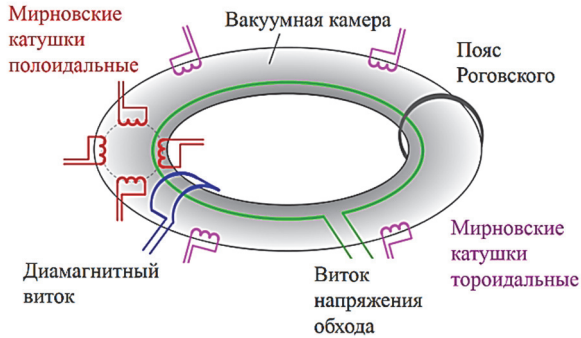


Рис. 2.6. Схема измерений магнитными зондами параметров плазменного разряда в токамаке

Напряжение тороидального вихревого поля (называемое также напряжением обхода) V_L измеряется с помощью витка, уложенного вдоль всего тороидального обхода камеры, такой виток монтируется на внутреннюю поверхность камеры и изолируется от действия плазмы. Ток плазмы I_p измеряется с помощью пояса Роговского (таких поясов может быть несколько), охватывающего плазменный разряд по полоидальному обходу. Монтаж поясов Роговского может быть внутри камеры для измерения тока в плазменном разряде, при этом конструкцию изолируют от воздействия плазмы. Также пояса Роговского монтируют снаружи камеры для измерения суммарного тока в плазменном разряде и по камере, это позволяет оценить ток по камере токамака для оценки эффективности индуктивной генерации тока в плазме.

Используя данные таких измерений V_L и I_p может быть оценена проводимость и удельное электрическое сопротивление плазмы. Электронная температура T_e оценивается из значения удельного электрического сопротивления η плазменного шнура, используя приближение Спитцера:

$$\eta = \frac{m_e e_i}{n_e e^2} = \frac{(m_e)^{1/2} Z e^2 \ln \Lambda}{51,6 \pi^{1/2} e_0^2} = 5,2 \cdot 10^{-5} Z \ln \Lambda \left(\frac{k T_e}{e} \right)^{-3/2},$$

где kT_e/e в эВ; η в мОм; $\ln A = 20$. Поскольку распределение параметров плазмы по малому радиусу имеет колоколообразную зависимость с максимумом в центре, то оценка электронной температуры таким методом отражает среднюю по радиальному профилю величину. Такая оценка важна с практической точки зрения для оперативного контроля параметров плазменного разряда.

Традиционно в токамаке используют наборы магнитных зондов, называемых катушки Мирнова (по имени Сергея Васильевича Мирнова, впервые с коллегами применившего такие зонды для обнаружения крупномасштабных неустойчивостей в токамаке). Схема катушек Мирнова в камере токамака приведена на рис. 2.6. Полоидальные катушки Мирнова охватывают плазменный разряд по малому обводу тора, тороидальные – по большому обводу тора. В полоидальной и тороидальной сборках по четыре катушки Мирнова, но их может быть больше, например, десятки катушек в одной сборке. Катушки намотаны на немагнитный каркас, конструкция катушек изолируется от действия плазмы путем покрытия металлическим экраном. Из-за несовершенного монтажа катушек сигнал от тороидального магнитного поля может вносить вклад вместе с сигналом полоидального магнитного поля, что нужно учитывать при анализе результатов измерения.

Сборки магнитных зондов используются для обнаружения нестабильностей плазмы, которые генерируют электрические токи в плазме и, следовательно, переменный магнитный поток. Такой поток индуцирует напряжение в катушках Мирнова, которое регистрируется системой измерения.

Из измерения магнитного потока $\delta\Phi$ с помощью диамагнитных витков можно оценить значение полоидального β_p и давление плазмы p в среднем по сечению, β_p определяется как

$$\beta_p = \frac{p}{B_p^2 / 2\mu_0} = 1 + \frac{8\pi B_t}{\mu_0 I_p^2} \delta\Phi.$$

При $\beta_p > 1$ плазма является диамагнетиком. При $\beta_p < 1$ плазма парамагнетик, причина заключается в протекании продольного

тока вдоль винтовых магнитных линий, возникающая при этом полоидальная компонента тока генерирует дополнительное тороидальное магнитное поле.

Магнитные зонды, расположенные вокруг плазменного разряда, используются для определения положения плазменного шнура в камере относительно ее центра. Соответствующие сигналы используются в системах с обратной связью для регулирования положения разряда путем управления вертикальным магнитным полем. Схема управления представлена на рис. 2.7. Необходимая величина вертикального поля для равновесия B_{\perp} связана с величиной $\Lambda = \beta_p + l_i/2 - 1$, значение Λ может быть оценено по β_p и l_i – нормированной внутренней индуктивности тороидального плазменного разряда :

$$B_{\perp} = -\frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a} + \Lambda - \frac{1}{2} \right).$$

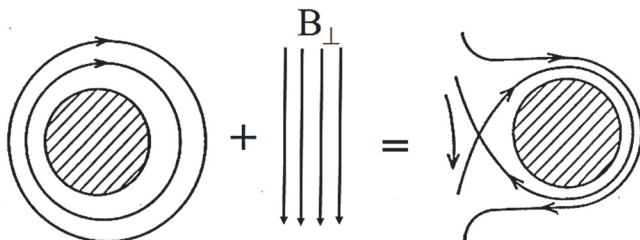


Рис. 2.7. Полоидальное магнитное поле в токамаке – сумма поля от тока плазмы и вертикального магнитного поля приложенного для равновесия плазменного витка

Кроме магнитных зондов для измерения интегральных энергетических характеристик плазменного разряда используются детекторы излучения из плазмы. Используются твердотельные детекторы излучения плазмы в оптическом и рентгеновском диапазонах. В современных токамаках используются диагностические системы, содержащие многочисленные детекторы, устанавливаемые в диагностических портах, которые позволяют измерить профили электронной температуры по интенсивности мягкого рентгенов-

ского излучения (тормозного излучения), пространственное распределение концентрации примесей в плазменном разряде и другие важные параметры.

Быстрые видеокамеры наблюдения с регистрацией оптического излучения разряда через диагностические порты позволяют регистрировать динамику плазмы, оценивать стабильность и крупномасштабные МГД-неустойчивости.

При исследовании механизмов неустойчивостей и процессов, вызывающих потери энергии и частиц плазмы из магнитной ловушки токамака требуются данные экспериментальных измерений параметров плазмы (концентрации, температуры электронов и ионов, токов и полей в плазме), их распределений в пространстве и динамику во времени. Для измерения таких характеристик плазмы используются специальные диагностические системы с применением лазерного и пучкового зондирования плазмы, регистрации излучения плазмы в различных спектральных диапазонах, регистрации частиц, токов и потоков плазмы с помощью зондов и детекторов, устанавливаемых на границе плазменного разряда. Такие диагностики плазмы являются сложными системами, специально разрабатываемые для токамаков, некоторые из них уникальны и требуют большого экспериментального искусства при создании и эксплуатации.

2.2. Критерии стабильного удержания плазмы в токамаке

2.2.1. МГД – неустойчивость плазмы

Характеристики удержания плазмы в магнитной ловушке токамака связаны с пространственной структурой магнитного поля и токов в плазме, концентрации и температуры частиц, давления плазмы. Эффективность удержания плазмы в токамаке, динамика и стабильность плазмы определяются не только этими параметрами, но также их взаимным соотношением и взаимовлиянием.

Для описания плазмы в токамаке используют несколько безразмерных величин:

β – отношение газокINETического давления плазмы к магнитному давлению тороидального магнитного поля, $\beta = p/(B_i^2/2\mu_0)$;

β_p – полоидальное бета, определяемое как отношение газокинетического давления к магнитному давлению полоидального магнитного поля $\beta_p = p/(B_p^2/2\mu_0)$;

q – параметр запаса устойчивости, $q(r) = Br/B_pR$, характеризующий магнитную структуру на радиусе r . Поскольку продольный ток в плазменном разряде токамака зависит от малого радиуса, то параметр q также зависит от малого радиуса.

При рассмотрении равновесия плазменного разряда в первую очередь рассматривают наиболее опасные неустойчивости – магнито-гидродинамические неустойчивости плазмы (МГД-неустойчивости) в виде быстро нарастающих возмущений с длинами волн поперек магнитного поля, много бóльшими ларморовского радиуса ионов, вплоть до размеров всего плазменного шнура. К МГД-неустойчивостям принадлежат винтовая неустойчивость; желобковая (конвективная, или перестановочная); разрывная (тиринг-неустойчивость). Теоретическое описание МГД-неустойчивостей выполняется в рамках магнитной гидродинамики.

Энергетическим источником крупномасштабных магнито-гидродинамических неустойчивостей является магнитная энергия, связанная с током, и газокинетическая, связанная с давлением. МГД-неустойчивости могут приводить к перестройке или даже разрушению плазменной конфигурации. В токамаке с невысоким полоидальным бета β_p главный резервуар энергии для развития МГД-неустойчивостей связан преимущественно с током, необходимым для поддержания равновесия.

При рассмотрении МГД-неустойчивостей в тороидальной геометрии плазмы рассматривают резонансное возмущение. Это винтовое возмущение в пространстве вида $\exp(i(m\theta - n\phi))$, шаг которого совпадает со средним шагом магнитной силовой линии (θ – полоидальный угол, ϕ – тороидальный угол). Условие этого резонанса: $nq = m$, где q связан с углом наклона магнитной линии к продольной оси. Магнитная поверхность, на которой выполняется это условие, называется резонансной. Резонансные возмущения не приводят к локальным изгибам магнитной линии, которые требуют затрат энергии.

Действуя вдоль всей магнитной линии, даже малое резонансное возмущение может далеко увести магнитную линию от невозмущенного положения.

В токамаке формируется перекрещенность магнитных линий на соседних магнитных поверхностях, так называемый шир, определяемый характеристикой:

$$s = -r q'(r)/q .$$

Если шаг магнитных линий на разных магнитных поверхностях непостоянный, т.е. имеется «шир» $s \neq 0$, то на некотором расстоянии от резонансной магнитной поверхности возмущение будет менять знак вдоль магнитной линии и общий эффект его ослабится. Таким образом, шир ограничивает ширину возмущенного слоя. Структура этого слоя зависит от электропроводности плазмы.

Возможными МГД нестабильностями в плазменном разряде токамака являются винтовые неустойчивости. Винтовая неустойчивость мало чувствительна к величине давления плазмы, поскольку ее причина – продольный ток, а не давление плазмы. Такие неустойчивости могут быть стабилизированы путем задания профиля тока и выбором коэффициента запаса устойчивости $q(a)$ (будем обозначать этот параметр q_a) на границе плазменного разряда при малом радиусе $r = a$.

Для выбора q_a на краю плазменного разряда используется критерий стабилизации плазмы сильным магнитным полем Крускала–Шафранова $q_a > 1$.

Этот критерий является одним из главных для получения устойчивого плазменного разряда в токамаке. Из этого критерия следует, что для устойчивого плазменного тороидального разряда (в котором $R/a \sim 3$ как, например, в ИТЭР) с большим током плазмы I_p (ток определяет поле $B_p \sim I_p$) требуется сильное тороидальное магнитное поле B_t . Несмотря на то, что теоретический предел стабильности в соответствии с этим критерием $q_a > 1$, в экспериментах для гарантированной стабильности выбирают $q_a \sim 2 \div 3$, в рекордных экспериментах достигают значение $1,4 \div 1,6$.

Кроме крупномасштабных винтовых неустойчивостей в токамаке возможна неустойчивость, связанная с градиентом давления, при которой магнитные трубки с плазмой перемещаются в область с меньшей энергией. Такое перемещение будет ограничиваться изменением шага винта магнитных линий (т.е. формируется изменение угла наклона магнитных линий по малому радиусу) – широм магнитного поля. Шир соответствует условию $q'(r) \neq 0$. При нулевом шире эта неустойчивость аналогична известной неустойчивости Релея–Тейлора, возникающей в жидкости с градиентом плотности в поле тяжести. Роль силы тяжести в магнитной ловушке играет кривизна магнитных линий. При отсутствии шира в выпуклых силовых линиях, плазма неустойчива. Шир оказывает стабилизирующее влияние на плазму. В дополнение к этому фактору необходимо условие знакопеременности нормальной кривизны магнитных силовых линий, определяемой как

$$k_n = -\mathbf{n} \frac{\mathbf{B}}{B} \nabla \frac{\mathbf{B}}{B} = -\frac{\mathbf{n} \nabla (B^2 + 8\pi p)}{2B^2},$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к магнитной поверхности.

На внешнем обводе тороидального разряда в токамаке кривизна всегда положительная, на внутренней стороне тора при $q > 1$ магнитная линия вогнута и кривизна отрицательная. В целом для плазмы с умеренным давлением, средняя кривизна магнитной линии при тороидальном обходе оказывается отрицательной из-за быстрого выравнивания давления со звуковой скоростью вдоль магнитной трубки. Такой эффект отрицательной кривизны соответствует росту напряженности магнитного поля при отходе от рассматриваемой поверхности, то есть создается магнитная яма. Благодаря такой возникающей в токамаке магнитной яме возникает критерий локальной устойчивости:

$$\frac{s^2}{4} + \frac{8\pi p'(\rho)\rho}{B^2} (1 - q^2) > 0.$$

Если локальное значение $q(r) > 1$, то плазма устойчива. Магнитная яма стабилизирует также диссипативные неустойчивости.

Стабилизируя моду $m = 1$, продольное магнитное поле может вызвать неустойчивость мод $m \geq 2$, деформирующих сечение плазменного шнура без нарушения формы его оси. Были определены критерии устойчивости при определенных значениях $q(a)$ – зоны устойчивости, найденные В.Д. Шафрановым (фото на рис. 2.8).

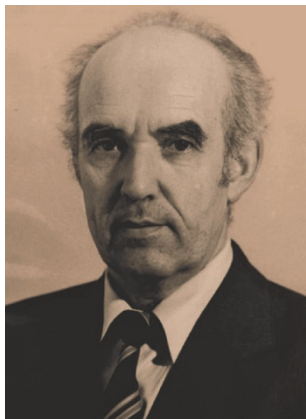


Рис. 2.8. Виталий Дмитриевич Шафранов

Этот эффект зависит от профиля тока. Таким образом, при благоприятном радиальном профиле тока в токамаке можно достичь равновесие относительно винтовых неустойчивостей, что является оптимистичным фактором использования концепции токамака для термоядерного реактора. По мере нарастания тока в токамаке наблюдаются всплески колебаний при прохождении целочисленных значений $q(a)$ (от $q(a) > 10$ до $q(a) \sim 2 \div 3$) и устанавливается колоколообразный радиальный профиль тока.

Даже если плазма стабильна в отношении развития идеальных винтовых МГД-неустойчивостей, другие МГД-неустойчивости (тиринг-моды) могут быть нестабильными для плазмы с конечным сопротивлением. В пространственных зонах на так называемых резонансных магнитных поверхностях с радиусами r , где коэффициент запаса $q(r)$ принимает рациональное значение $q(r) = 1, 3/2, 2$, возбуждаются тиринг-моды и образуются магнитные острова, схема которых показана на рис. 2.9. Резонансная поверхность расщепляется на m винтовых структур.

Теоретически показано, что колоколообразный профиль тока с малым градиентом в поверхностном слое может обеспечить устойчивость относительно всех крупномасштабных (с малыми m и n) винтовых и тиринг-мод.

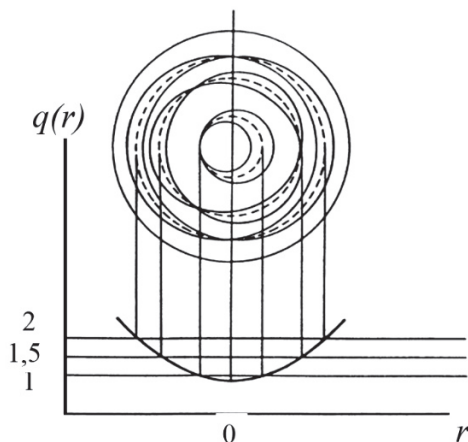


Рис. 2.9. Магнитные острова с $m = 1$, $m = 3/2$, $m = 2$ при $q(r) = 1, 3/2, 2$

В случае формирования профиля тока плазмы с коэффициентом запаса устойчивости в центре $q(0) < 1$, на рациональной поверхности $q(r) = 1$ возникает винтовая мода с $m = 1$, $n = 1$. В результате центральная горячая зона плазмы выталкивается, когда происходит пересоединение магнитных поверхностей и профиль сглаживается. Таким образом, тепловая энергия теряется из центральной горячей зоны. Поскольку температура электронов в центральной зоне выше и сопротивление меньше, профиль тока снова достигает максимума и повторяется тот же процесс. Эта неустойчивость, механизм которой впервые был описан Б.Б. Кадомцевым (фото на рис. 2.10) называется внутренним срывом.

При неблагоприятных условиях после циклического развития внутренних срывов развивается большой срыв, приводящий к прекращению разряда в результате глобальной потери устойчивости.

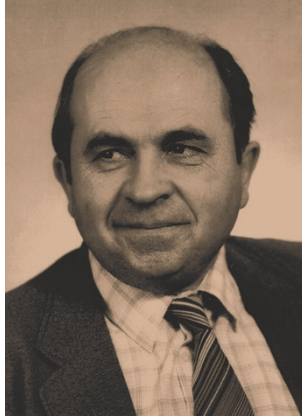


Рис. 2.10. Борис Борисович Кадомцев

2.2.2. Бета-предел равновесия в токамаке

Плотность выходной мощности ядерного синтеза в реакторе пропорциональна $n_e^2 \langle \sigma_{DT} \rangle$. Поскольку $\langle \sigma_{DT} \rangle$ пропорционально T_i^2 в области, близкой к $T_i \approx 10$ кэВ, выходная мощность термоядерного синтеза пропорциональна квадрату давления плазмы p . Следовательно, чем выше бета $\beta = p/(B_i^2/2\mu_0)$, тем экономичнее термоядерный реактор, поскольку стоимость магнитной системы токамак-реактора (ИТЭР и будущих реакторов) составляет существенную часть от общей стоимости.

Когда давление плазмы повышается, при превышении критического значения β развивается баллонная неустойчивость. Эта неустойчивость обусловлена градиентом давления и локализована в области неблагоприятной кривизны магнитного поля – на внешнем обводе тороидального разряда.

Верхний предел значения полоидального бета β_p (отношение газокинетического давления к магнитному давлению полоидального магнитного поля) для круглого токамака (т.е. с круглым сечением плазмы) задается условием

$$\beta_p = 0,5 R / a.$$

Полоидальное бета характеризует основной резервуар энергии для развития МГД-неустойчивостей.

С учетом значения фактора запаса устойчивости q_a на границе, верхний предел устойчивости для полного β задается условием:

$$\beta = \frac{p}{B^2/2\mu_0} \approx \frac{p}{B_p^2/2\mu_0} \left(\frac{B_p}{B_t}\right)^2 = \left(\frac{a}{Rq_a}\right)^2 \beta_p,$$

где $\beta = 0,5 (a/R)/q_a^2$.

Среднее значение $\beta \approx 3\%$ было получено в экспериментах на токамаках с круглым поперечным сечением.

Из оценки максимальной скорости роста МГД-неустойчивостей в плазме токамака с удлиненным сечением (дивертором) получен верхний предел значения β_c (критическое значение бета) для стабильного разряда (называемое критерием Тройона):

$$\beta_c = \beta_N I_p / (aB_t),$$

где a – малый радиус, м; I_p – ток плазмы, МА; B_t – тороидальное магнитное поле, Тл; β_N называется фактором Тройона или нормализованной бета, типичное значение $\beta_N = 2 \div 4$ определяется из экспериментальных данных.

Для токамака с удлиненным (эллиптическим) сечением предел зависит от геометрического параметра $K = ((1 + k_s^2)/2)^{1/2}$, $k_s = b/a$ – параметр эллиптичности, который определяет длину окружности вдоль полоидального направления $2\pi aK$, полоидальное магнитное поле $B_p \equiv \mu_0 I_p / (2\pi aK)$, фактор запаса устойчивости для эллиптической формы плазмы $q(r) \equiv K r B_t / (R B_p)$:

$$\beta_c = 5\beta_N K^2 a / (Rq_a).$$

Для оценки фактора запаса устойчивости на границе в диверторном токамаке используют его значение на магнитной поверхности, охватывающей 95% магнитного тороидального потока, обозначая q_{95} :

$$q_{95} = q_a f_\delta f_A = \frac{aB}{(\mu_0/2\pi)RI} \frac{1 + k_s^2}{2} f_\delta f_A,$$

$$f_\delta = \frac{1 + k_s^2(1 + 2\delta^2 - 1,2\delta^3)}{1 + k_s^2}, \quad f_A = \frac{1,17 - 0,65/A}{(1 - 1/A^2)^2},$$

где δ – коэффициент треугольности сечения плазмы ($\delta \approx \Delta/a$), аспектное отношение $A = R/a$. Пояснение расчета δ представлено на рис. 2.11.

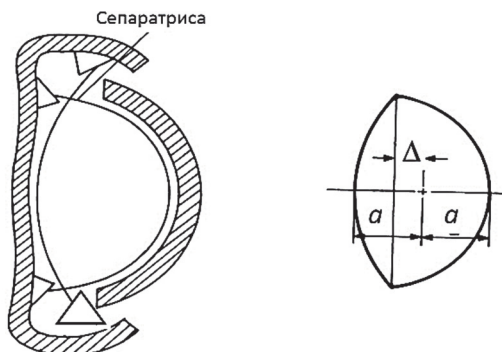


Рис. 2.11. Определение треугольности $\delta \approx \Delta/a$ в диверторном токамаке с сепаратрисей

2.2.3. Неустойчивость срыва

МГД-колебания в виде винтовых мод небольшой амплитуды присутствуют в токамаке всегда. Если амплитуда этих возмущений увеличивается, то можно наблюдать «магнитные острова» в поперечном сечении магнитных поверхностей (см. рис. 2.9). В токамаке иногда развивается очень опасное явление – неустойчивость срыва (*disruption*). В срыве происходит выброс из разряда энергии и плазмы, сильные МГД-колебания и уплощение профиля распределения плотности и тока по радиусу. Неустойчивость срыва может привести к прекращению тока и разрушению плазменного шнура плазмы – это так называемый большой срыв. Могут развиваться и малые срывы, в которых выбросы частиц и энергии из плазмы могут повторяться многократно, не разрушая полностью плазменный шнур. В малых и в больших срывах на сигнале напряжения обхода наблюдаются отрицательные пики из-за выталкивания из плазмы части полоидального магнитного потока.

Неустойчивость срыва сопровождается так называемыми пилообразными колебаниями, регистрируемыми на сигналах датчиков мягкого рентгеновского излучения из центральной области плазменного разряда. Это свидетельствует о колебании электронной температуры в центре разряда. Каждый всплеск имеет длительность в несколько миллисекунд с медленно нарастающей интенсивностью и затем с быстрым спадом – резким снижением температуры в центральной зоне внутри некоторой области $r < r_s$. После спада температуры происходит ее резкий подъем. Вне этой области при $r > r_s$ происходит противоположная динамика – после медленного спада температуры происходит ее резкий подъем. Перед спадом температуры в области $r < r_s$ возбуждаются колебания моды $m = 1$. Эти явления «внутреннего срыва» объясняются развитием внутренней моды $m = 1$ в области $q < 1$ ($q = 1$ как раз при $r = r_s$) с последующим перезамыканием силовых линий. Это проиллюстрировано на рис. 2.12.

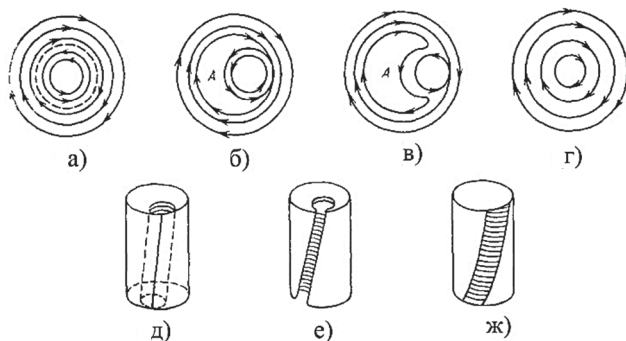


Рис. 2.12. Перезамыкание магнитных поверхностей в приосевой области токамака:
поперечное сечение (а–г); отрезок тороида (д–ж)

Вначале величина q меньше единицы в центре плазменного разряда и нарастает к периферии, обращаясь в единицу на пунктирной кривой на рис. 2.12а. По отношению к винтовому возмущению $m = 1, n = 1$ магнитные линии имеют положительную поперечную

компоненту внутри $r = r_s$ и отрицательную снаружи $r = r_s$ (т.е. шаг силовых линий меньше $2\pi R$ внутри и больше $2\pi R$ снаружи). При винтовом искривлении происходит встреча перекрещенных магнитных линий (рис. 2.12б) и их перезамыкание (рис. 2.12в, г), этот механизм описан Б.Б. Кадомцевым. Сходная, но более сложная картина перезамыкания магнитных линий происходит и при неустойчивости срыва. Обычно срыв начинается с развития винтового возмущения с $m = 2, n = 1$. Если это возмущение и соответствующий ему магнитный остров достаточно велики, то может начаться взаимодействие с другими модами (например, с внутренней модой с $m = 1, n = 1$), которое порождает новые моды и соответствующие острова. При соприкосновении островов появляется возможность перезамыкания магнитных линий и уплотнение распределения тока по радиусу. Рассматриваются более сложные картины «турбулизации» магнитной структуры во время сброса тепла из центральной области, проводятся экспериментальные исследования этого явления для обнаружения всех механизмов, влияющих на срыв.

В конечном счете резервуаром энергии для неустойчивости срыва служит энергия полоидального магнитного поля. Поэтому тот же процесс можно понять на основе идеализированной картины Б.Б. Кадомцева (проникновение внутрь плазмы винтовых «вакуумных пузырей») и интерпретировать в терминах разрыва шнура из-за взаимодействия тока с продольным полем.

Последствия большого срыва в результате выброса горячей плазмы из центра разряда на стенку могут приводить к мощным плазменно-тепловым нагрузкам на материал стенки, вызывая эрозию и даже разрушение обращенных к плазме облицовочных теплозащитных плиток камеры и дивертора. Чтобы избежать неустойчивости срыва, нужно контролировать профиль распределения тока по радиусу. Для ограничения условий развития большого срыва предлагается использовать дополнительные обмотки с током, которые изменяют структуру магнитных полей вблизи сепаратрисы, что вызывает эффекты стабилизации МГД-неустойчивостей в плазме. Предлагается также инжектировать нейтральный газ в зону развития

магнитных островов на начальной стадии развития большого срыва для подавления роста магнитных островов. Такие эксперименты проводятся на современных токамаках и предлагаются для ИТЭР.

2.2.4. Кинетические неустойчивости и аномальный перенос

В плазме токамака кроме крупномасштабных МГД-неустойчивостей могут развиваться мелкомасштабные неустойчивости, вызванные движениями разных групп частиц. Анализ таких неустойчивостей можно проводить в рамках кинетического уравнения с самосогласованными электрическими и магнитными полями, поэтому они называются кинетическими. Рассматриваются дрейфовые неустойчивости, вызванные возбуждением дрейфовых волн. В тороидальной геометрии токамака появляются явления раскачки мелкомасштабных колебаний, в том числе с участием запертых частиц. Неустойчивости дрейфового типа в результате сложных нелинейных диссипативных процессов создают сильную турбулентность плазмы, приводя к флуктуациям плотности и температуры, возмущая магнитные поверхности, слабо их разрушая. Вследствие этого возникает аномальный перенос поперек магнитного поля с эффективным коэффициентом диффузии выше коэффициента, определяемого эффектами классической кулоновской столкновительной диффузии. В результате возникает деградация удержания плазмы в магнитной ловушке токамака. Аномальный перенос и сильную турбулентность плазмы исследуют в токамаках с целью выработать предложения по режимам удержания и возможности управления этим процессом.

К кинетическим неустойчивостям относятся наблюдаемые в токамаках колебания, возбуждаемые убегающими электронами, которые набирают энергию в продольном электрическом поле, уходя в «просвист», так как не могут быть заторможены из-за быстрого убывания сечения кулоновских столкновений при увеличении энергии. Вращающийся в магнитном поле ускоренный электрон может возбуждать волну, увеличивая свою поперечную

и уменьшая продольную скорость. В результате возбуждения такой неустойчивости «веерного» типа в плазме токамака возбуждаются всплески колебаний с выбросом быстрых электронов. Такие электроны большой энергии (в крупном токамаке может достигать сотни кэВ и более) изменяют функцию распределения частиц и при выходе на стенку могут приводить к повреждению материальной поверхности.

2.2.5. Периферийный слой СОЛ и дивертор

Диверторная конфигурация токамака, показанная на рис. 2.13, эффективна для оптимизации плазменных нагрязок на материальные компоненты при взаимодействии плазмы со стенкой. Плазменные потоки под действием радиальной диффузии и дрейфов из центральной зоны разряда достигают сепаратрисы. После пересечения сепаратрисы в радиальном направлении потоки плазмы проникают в пристеночный слой, называемый СОЛ (*scrape-off-layer* – SOL). В пристеночном слое плазма преимущественно течет вдоль магнитных линий на пластины нейтрализации (теплозащитной облицовки) дивертора, где плазма нейтрализуется. Процесс нейтрализации плазмы происходит в пристеночном слое над поверхностью и на поверхности пластин. Несколько механизмов, зависящих от параметров плазмы, регулируют процесс нейтрализации. При этом кинетическая энергия частиц плазмы перераспределяется в кинетическую энергию образовавшихся атомов (называемых атомами перезарядки), передается на стенку, на возбуждение атомов. Схема потоков из центральной плазмы на стенку показана на рис. 2.14. Динамика плазмы и механизмы, регулирующие параметры плазмы в диверторной области и СОЛ, являются очень сложными и взаимозависимыми, теоретически описать их в полном объеме для всех режимов удержания плазмы в токамаке не удастся. Поэтому проводятся экспериментальные исследования таких процессов для выявления эмпирических закономерностей с целью предсказания режимов эксплуатации в будущих токамаках реакторного размера, в том числе в ИТЭР.

При высокой плазменной нагрузке материальная поверхность пластин нейтрализации дивертора подвергается эрозии, материалы эрозии в виде атомов, молекул и даже капель с поверхности попадают в плазму. Такие процессы поступления примесей в плазму приводят к ее радиационному охлаждению и отрицательно влияют на характеристики разряда.

Высокая тепловая нагрузка на пластины дивертора является одной из наиболее важных проблем реактора ИТЭР и будущих термоядерных реакторов.

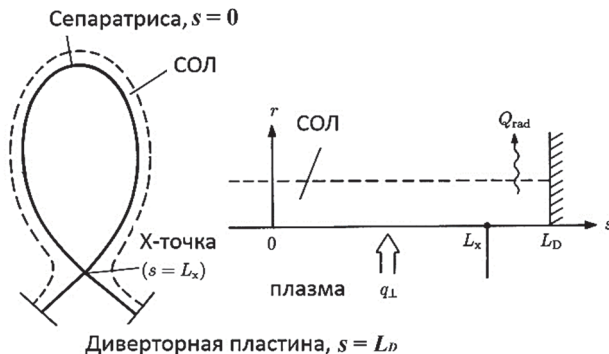


Рис. 2.13. Конфигурация пристеночного слоя СОЛ и дивертора (справа – схема потоков тепла в пристеночной зоне, плоская модель)

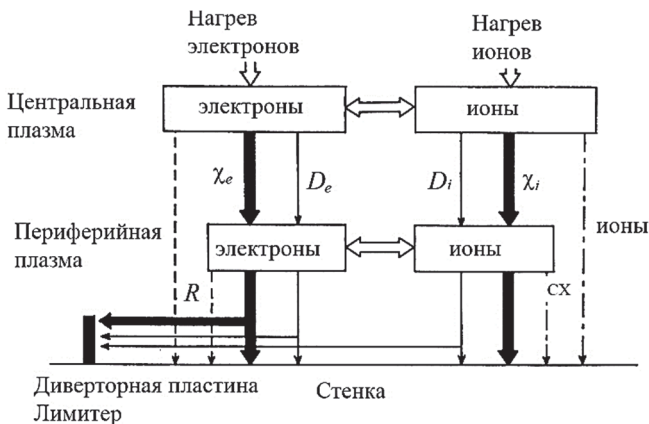


Рис. 2.14. Схема переноса потоков тепла и частиц (ионов и электронов) из центральной плазмы к стенке

Темные стрелки (рис. 2.14) – потоки тепла определяемые теплопроводностью ионов χ_i и электронов χ_e ; светлые стрелки – конвективные и диффузионные потери частиц с коэффициентом диффузии ионов D_i и электронов D_e ; пунктирная стрелка – излучательные (радиационные) потери (R); точно-пунктирные стрелки – потери ионов при обмене зарядами с нейтральными атомами (перезарядка) (CX).

2.2.6. Мощность излучательных потерь

Мощность потерь энергии при тормозном излучении $P_{\text{торм}}$, Вт/м³, из-за столкновения электрона с ионом на единицу объема составляет

$$P_{\text{торм}} = 1,5 \cdot 10^{-38} Z_{\text{eff}} n_e^2 (kT_e/e)^{1/2},$$

где Z_{eff} – эффективное значение зарядового состояния ионов, определяемое с учетом концентрации примесных ионов в плазме:

$$Z_{\text{eff}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i},$$

где n_i – концентрация ионов примеси с зарядом Z_i , суммирование выполняется по всем i -типам примесей. Z_{eff} характеризует степень «загрязнения» плазмы примесными ионами.

Время потери энергии плазмы $t_{\text{торм}}$, с, из-за тормозного излучения, определяемое как $t_{\text{торм}} = (3/2)n_e kT_e / P_{\text{торм}}$, равно

$$t_{\text{торм}} = 0,16 (1/Z_{\text{eff}} n_{20})(kT_e/e)^{1/2},$$

где n_{20} в единицах 10^{20} м^{-3} , kT_e/e в единицах эВ.

При $n_e \approx 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $kT_e/e \approx 10 \text{ кэВ}$, значение $t_{\text{торм}} \approx 8/Z_{\text{eff}}$, с. Для ИТЭР при $Z_{\text{eff}} > 2$ это время становится сравнимым с временем удержания энергии, которое около 4 с. Поэтому, если значительно усиливаются потери из-за излучения примесными ионами, такого как тормозное излучение, рекомбинационное излучение и излучение линейчатого спектра, выше определенного предела, самоподдерживающаяся реакция синтеза ядер в плазме не может быть реализована.

При взаимодействии горячей плазмы с материалами стенки и обращенных к плазме внутрикамерных компонентов (лимитеров, диверторных пластин, ВЧ антенн и др.) возникают условия эрозии и распыления. В результате продукты эрозии в виде ионов проникают в плазму, что вызывает большие потери энергии из-за излучения, приводя к радиационному охлаждению плазмы. Поэтому контроль примесей, поступающих в плазму, является одним из наиболее важных вопросов в экспериментах с термоядерной плазмой. Уменьшение излучения примесей в основной плазме возможно с использованием конфигурации дивертора, в котором поступление примесей в основной разряд ограничено магнитной структурой дивертора. Легкие примеси, такие как углерод и кислород, могут быть удалены путем прогрева и откачки вакуумной камеры и всех внутрикамерных компонент перед началом эксперимента. Эффекты распыления тяжелых атомов (железа и других) материала стенки можно значительно уменьшить, покрыв металлическую стенку углеродными или бериллиевыми плитками. Предлагаются также методы покрытия бором (боронизация) и литием (литиезация). В современных токамаках предлагаются конструкции дивертора с дополнительными элементами, ограничивающими поступление примесей в основной разряд и распыление диверторных пластин. Для этого предлагаются следующие схемы конструкции дивертора: закрытый дивертор, многокамерный дивертор, дивертор с напуском нейтрального газа для уменьшения температуры диверторной плазмы и, соответственно, подавления распыления пластин нейтрализации.

2.2.7. Предел по плотности

В токамаке стабильные разряды возможны в определенном диапазоне токов плазмы I_p и концентрации n_e . Для критерия стабильного разряда используется нормированная плотность Гринвальда (называемая также параметр Гринвальда–Хьюгилла–Мураками):

$$N_G \equiv n_{20} / (I_p / \pi a^2),$$

где I_p – ток плазмы в мегаамперах; a – малый радиус в метрах.

Из многочисленных экспериментов была получена эмпирическая закономерность $N_G < 1$ для стабильных разрядов, определяющая диапазон рабочих параметров. В экспериментах эмпирическая закономерность $N_G < 1$ выполняется для большинства стабильных разрядов в современных токамаках. Это ограничение обусловлено увеличивающимися потерями энергии из-за повышения радиационных потерь при увеличении плотности электронов и риском развития ряда неустойчивостей.

Для удобства экспериментаторов и выбора устойчивых режимов удержания с фиксированным фактором запаса устойчивости q_a , N_G выражается также формулой:

$$N_G = (0,628 / K^2) (n_{20} / B_t / R) q_a,$$

где B_t – тороидальное магнитное поле; Тл, R – большой радиус, м; параметр эллиптичности K для диверторной плазмы:

$$K = \left[(1 + (b/a)^2) / 2 \right]^{1/2}.$$

Верхний предел электронной плотности критически зависит от взаимодействия со стенкой плазмы и имеет тенденцию к увеличению по мере увеличения мощности нагрева, хотя условие $N_G < 1$ не отражает зависимости от мощности нагрева плазмы, есть возможность его увеличить. Коэффициент запаса устойчивости q_a на границе плазмы в экспериментах выбирается $q_a > 3$.

За пределами стабильной области (при $N_G > 1$, $q_a < 2 \div 3$) возникает сильная нестабильность – неустойчивость большого срыва, называемая также срывом при предельно высокой плотности. Такую неустойчивость сопровождают отрицательные импульсы напряжения обхода из-за быстрого расширения канала тока (сглаживание радиального профиля тока), т.е. быстрого уменьшения внутренней индуктивности. Тепловая энергия плазмы внезапно теряется за доли миллисекунд. Электронная температура быстро падает и сопротивление плазмы увеличивается. В напряжении обхода появляется положительный импульс. Затем плазменный разряд быстро прекращается. Для объяснения такой неустойчивости срыва рассматриваются механизмы перекрытия магнитных

островов с $m = 2$ и $n = 1$ (достижение $q(r) = 2$ в зоне перекрытия), $m = 3$ и $n = 2$ (достижение $q(r) = 1,5$) или пересоединение магнитных островов с $m = 2$ и $n = 1$, $m = 1$ и $n = 1$.

2.2.8. Режим удержания плазмы в омическом режиме и в L-моде

При омическом нагреве плазмы время удержания энергии описывается нео-Алкаторным скейлингом τ_{OH} , с:

$$\tau_{OH}(s) = 0,103q^{0,5}\bar{n}_{e20}a^{1,04}R^{2,04}.$$

При высокой электронной концентрации более $2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ линейная зависимость от концентрации изменяется и наблюдается насыщение зависимости.

При дополнительном нагреве плазмы (ВЧ волнами ЭЦРН, ИЦРН или при нейтральной инжекцией) удержание деградирует, время удержания энергии уменьшается с увеличением мощности нагрева. Такой режим назван L-мода (*Low* – низкий). Для его описания применяется скейлинг времени удержания энергии в L-моде τ_{AUX} , с:

$$\tau_{AUX}(s) = 0,037k_s^{0,5}I_pP_{tot}^{-0,5}a^{-0,37}R^{1,75},$$

где k_s – удлинение; P_{tot} – суммарная мощность нагрева, МВт.

Для более подробного описания используется скейлинг Голдстоуна–Кае, учитывающий омический нагрев:

$$\tau_E = (1/\tau_{OH}^2 + 1/\tau_{AUX}^2)^{-1/2}.$$

Такой скейлинг описывает экспериментальные результаты, получаемые на круглых токамаках и может применяться для диверторных токамаков при невысокой мощности нагрева плазмы.

Для L-моды в ИТЭР предложен скейлинг времени удержания энергии τ_E^{ITER-P} , с:

$$\tau_E^{ITER-P}(s) = 0,048I_p^{0,85}R^{1,2}a^{0,3}\bar{n}_{20}^{0,1}B^{0,2}\left(\frac{A_i k_s}{P}\right)^{1/2},$$

где $P = P_{tot} - P_{rad}$ – мощность; P_{rad} – мощность радиационных потерь.

2.2.9. Режим улучшенного удержания плазмы – «H-мода»

Улучшенное удержание плазмы в токамаке (называемое «H-режим» или «H-мода») было обнаружено в 1982 г. в экспериментах на диверторном токамаке ASDEX при мощном дополнительном нагреве плазмы инъекцией нейтрального пучка быстрых атомов. Дальнейшие эксперименты продемонстрировали достижение режима улучшенного удержания плазмы во многих токамаках, что стало основанием для планирования таких режимов в ИТЭР.

H-режим возникает, когда мощность нагрева превышает пороговое значение. В первых экспериментах это достигалось методом инъекции нейтрального пучка быстрых атомов, а затем и с применением других методов дополнительного нагрева. При переходе из L-моды удержания в H-моду (называемый L–H-переход) наблюдаются характерные изменения контрольных сигналов и характеристик плазмы: сигнал оптического излучения плазмы на α -линии рабочего газа в пограничной области (D_α линия дейтерия в дейтериевой плазме) внезапно уменьшается за время ~ 100 мкс, рециклинг атомов рабочего газа вблизи границы уменьшается. В то же время на краю разряда наблюдается заметное изменение радиального электрического поля E_r (в сторону отрицательного значения). Кроме того, плотность электронов и плотность тепловой энергии увеличиваются, а время удержания энергии нагретой плазмы увеличивается примерно в два раза. H-режим наблюдался в экспериментах на многих токамаках – в DIII-D, JET, JT60U, AUG, EAST и др. L–H-переход наблюдается не только в диверторных, но и в круглых токамаках.

Физические процессы, вызывающие L–H-переход и улучшенное удержание, связаны с эффектами самоорганизации плазмы. В H-режиме градиенты электронной температуры и электронной плотности становятся крутыми только внутри границы плазмы – вблизи сепаратрисы магнитного поля в узкой радиальной зоне формируется транспортный барьер (называемый периферийным транспортным барьером). В H-режиме радиальное электрическое поле E_r становится более отрицательным (направлено к центру плазмы)

в периферийной зоне разряда. Радиальное электрическое поле вызывает вращение плазмы со скоростью $\sim E_r/B_t$ в полоидальном направлении, что разрушает турбулентные ячейки, уменьшает поперечный перенос и приводит к переходу L-режима в H-режим. Процесс подавления турбулентного переноса поперек магнитного поля включает сложные механизмы, регулируемые радиальным электрическим полем и магнитным широм, включая стабилизацию баллонных мод при отрицательном магнитном шире. В результате формируются шировые течения и зональные потоки в полоидальном направлении, рис. 2.15. Вне зоны периферийного транспортного барьера формируется пьедестал – зона, ответственная за взаимодействие плазма-стенка, условия в которой крайне важны для поддержания стабильности H-режима.

Существенную роль в формировании и стабилизации H-режима играют условия в возникающих транспортных барьерах как периферийном, так и во внутреннем, рис. 2.16.

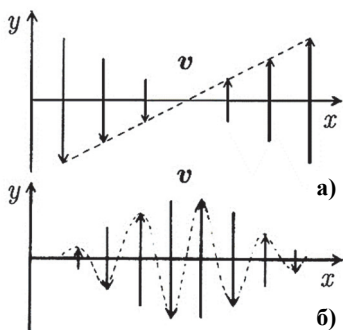


Рис. 2.15. Шировой профиль полоидального вращения (а); зональный поток (б)

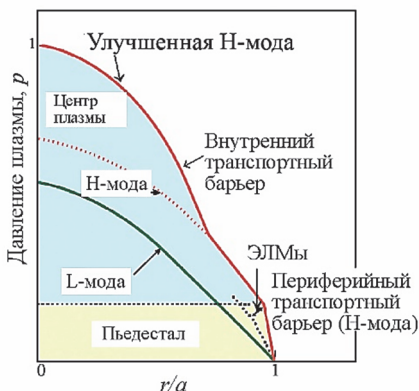


Рис. 2.16. Схема распределения давления в разряде токамака в различных режимах удержания: L-мода; H-мода; улучшенная H-мода с внутренним транспортным барьером

На основе измерений времени удержания энергии в экспериментах на многих токамаках в H-режиме был предложен эмпирический скейлинг, называемый IPB98y2:

$$\tau_{E,th}^{IPB98y2}(s) = 0,0562 I_p^{0,93} B_t^{0,15} P^{-0,69} M_i^{0,19} R^{1,97} \bar{n}_{19}^{0,41} \epsilon^{0,58} k^{0,78},$$

здесь используются единицы измерений: сек, МА, Тл, МВт, м, n_{e19} в 10^{19} м^{-3} . Этот скейлинг используется для предсказательного описания времени удержания энергии в ИТЭР в H-моде, рис. 2.17.

Переход в H-режим возникает при определенных условиях, экспериментально определен критерий такого перехода:

$$H_L \equiv \frac{\tau_E^{EXP}}{\tau_E^{ITER-P}}.$$

Наблюдаемые значения H_L -фактора в экспериментах достигают $2 \div 3$.

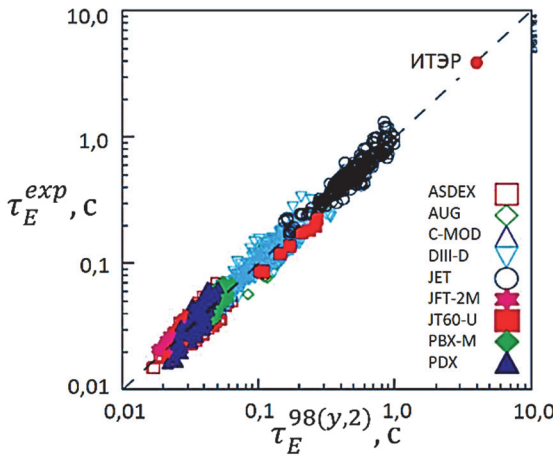


Рис. 2.17. Сравнение эмпирического скейлинга IPB98y2 времени удержания энергии в токамаке с экспериментальными данными измерения в H-режиме во многих токамаках

В экспериментах с улучшенным удержанием плазмы в современных токамаках JET, EAST, JT-60U, TFTR были получены рекордные параметры плазмы, табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Параметры плазмы достигнутые в экспериментах
на токамаках JET, JT-60U, TFTR**

Параметр	JET	JT-60U	TFTR
	без ЭЛМов № 26087	ЭЛМы № E21140	супершот
I_p , МА	3,1	2,2	2,5
B_t , Тл	2,8	4,4	5,1
R/a , м/м	3,15/1,05	3,05/0,72	~2,48/0,82
κ_s	1,6	1,7	1
q_{95}	3,8	4,6	–
q_l	2,8	3,0	2,8
$n_e(0)$, 10^{19} м^{-3}	5,1	7,5	8,5
$n_e(0)/\langle n_e \rangle$	1,45	2,4	–
$n_i(0)$, 10^{19} м^{-3}	4,1	5,5	6,3
$T_e(0)$, кэВ	10,5	10	11,5
$T_e(0)/\langle T_e \rangle$	1,87	–	–
$T_i(0)$, кэВ	18,6	30	44
W , МДж	11,6	7,5	6,5
dW_{dia}/dt , МДж/с	6,0	–	7,5
Z_{eff}	1,8	2,2	2,2
β_p	0,83	1,2	~1,1
β_t , %	2,2	~1,3	~1,2
g параметр Троена	2,1	~1,9	2
P_{NB} , МВт	14,9	24,8	33,7
E_{NB} , кэВ	135,78	95	110
$\tau_E = W/P_{tot}$, с	0,78	0,3	0,2
$H = \tau_E/\tau_E^{ITER-P}$	~3,0	~2,1	~2,0
$n_i(0) \tau_E T_i(0)$, $10^{20} \text{ кэВ м}^{-3} \text{ с}$	5,9	5	5,5
$n_T(0)/(n_T(0)^+ n_D(0))$	0	0	0,5
P_{fusion} , МВт	–	–	9,3

В экспериментах на крупных токамаках были обнаружены режимы, в которых характеристики удержания лучше, чем в традиционном Н-режиме, их называют супершоты, улучшенная Н-мода и др. Такие режимы возникают в плазме с внутренним транспортным барьером и специальной формой радиального распределения тока и давления плазмы, которые благоприятно влияют на удержание. Получение таких улучшенных режимов обусловлено большим количеством факторов, включая технические возможности управления нагревом плазмы в локальных зонах разряда, пониженным уровнем примесей в плазме, взаимодействием плазма–стенка и другими.

Характеристики режимов с улучшенным удержанием зависят от формы диверторной конфигурации, в том числе от параметра треугольности. На токамаке TCV в конфигурации с отрицательной треугольностью был обнаружен эффект роста времени удержания с увеличением мощности нагрева. Такой эффект выгоден для реакторных установок, где требуется большая мощность дополнительного нагрева плазмы для достижения термоядерных параметров. Поэтому в токамаках приступили к исследованию режимов удержания в диверторной конфигурации с отрицательной треугольностью.

2.2.10. Неиндуктивная генерация тока

До тех пор, пока плазменный ток генерируется только электромагнитной индукцией трансформатора тока в токамаке, плазменный разряд является импульсным процессом с конечной продолжительностью. Длительность тока (называемого омическим током) в такой схеме зависит от технических характеристик трансформатора тока. Для трансформатора с железным сердечником длительность тока пропорционально зависит от площади сечения железного сердечника. Для стационарного реактора – токамака необходим постоянный плазменный ток, который можно генерировать неиндуктивным способом. Это является актуальной задачей

исследований на токамаках. Используют несколько методов для генерации тока: ВЧ-методы нагрева плазмы, метод нейтральной инжекции в плазму пучков нейтральных атомов.

При инжекции в плазму пучков нейтральных атомов или при введении высокочастотных волн механизм генерации неиндуктивного тока связан с передачей импульса заряженным частицам плазмы, в результате чего возникает ток.

Наиболее эффективным методом генерации неиндуктивного тока является применение высокочастотных волн с частотой ниже-гибридного (НГ) резонанса. Процесс возбуждения тока связан с кинетическими эффектами в плазме. При распространении в плазме волны с НГ-частотой вдоль магнитной линии энергия волны передается заряженным частицам плазмы, движущимся с резонансной скоростью, что приводит к уплощению функции распределения (ФР) по скоростям в области резонансной скорости. Такое изменение, отклонение от равновесной (максвелловской) функции распределения по скоростям электронов и ионов, а также эффекты электрон-электронных и электрон-ионных столкновений при релаксации ФР приводят к генерации продольного тока в плазме. Величина тока зависит от мощности вводимых в плазму НГ-волн. Для генерации необходимого тока в токамаке реакторного размера требуются системы НГ-нагрева мощностью десятки МВт.

В многочисленных экспериментах на токамаках были продемонстрированы возможности неиндуктивной генерации тока при дополнительном нагреве плазмы несколькими методами: при инжекции пучка нейтральных атомов и при ВЧ-нагреве плазмы в токамаках JET, TFTR, T-10, PLT, Alcator C, T-7, AUG, DIII-D, TCV и др.

2.2.11. Дополнительный бустрэн-ток в плазме

Теоретически было предсказано, что радиальная диффузия плазмы индуцирует ток в тороидальном направлении, ток может быть большим в области банановой траектории запертых частиц.

Этот ток назвали бутстрэп-ток (*bootstrap current*), в экспериментах подтвердили такой эффект. Это важный процесс, который может обеспечить поддержание тока плазмы в токамаке.

Отношение величины бутстрэп-тока I_b к величине тока плазмы I_p

$$\frac{I_b}{I_p} \sim c \left(\frac{a}{R}\right)^{1/2} \beta_p,$$

где $c \approx 0,3$. Отношение токов может быть около 1, если β_p высокое ($\beta_p \sim R/a$) и давление плазмы достигает максимума.

Эксперименты показали, что доля бутстрэп-тока может достигать 70÷80% от общего тока плазмы в случае работы с высоким β_p . Такой режим планируется для ИТЭР.

2.2.12. Неоклассические тиринг-моды

Предельное рабочее давление токамака критически зависит от развития и интенсивности неидеальных МГД-неустойчивостей, возбуждаемых током и приводящих к образованию магнитных островов. При высоком значении полоидальной бета β_p и низком параметре столкновительности, градиент давления в плазме приводит к возникновению бутстрэп-тока. Если образуется магнитный островок, давление внутри островка имеет тенденцию выравниваться в радиальном направлении, тем самым устраняя причину бутстрэп-тока. Это приводит к образованию спиральной «полости» в бутстрэп-токе, который увеличивает размер острова. Когда продолжительность поддержания высокой торoidalной бета больше, чем временной масштаб диффузии тока – резистивного времени $t_R = \mu_0 a_s^2 / \eta$, где η – поперечное удельное сопротивление плазмы по радиусу, при этом полоидальная бета превышает критическое значение, то в магнитном острове возбуждаются неоклассические тиринг-моды (НТМ). Можно управлять условиями развития и интенсивностью НТМ с помощью генерации тока (например, методом ЭЦР-нагрева) в локальных зонах вблизи магнитных поверхностей, где значение запаса устойчивости является рациональным числом $q = m/n$.

2.2.13. Неустойчивости краевой плазмы – ЭЛМы

Режим улучшенного удержания (H-режим) часто сопровождается квазипериодическими релаксационными колебаниями, включающих МГД-активность и D_α -излучение, известные как режим с ЭЛМами (*Edge Localized Mode – ELM*). Эти явления в виде струй горячей плазмы, поступающих через сепаратрису из основного разряда в СОЛ и диверторную зону (рис. 2.18), приводят к высокой пиковой тепловой нагрузке и эрозии диверторных пластин.

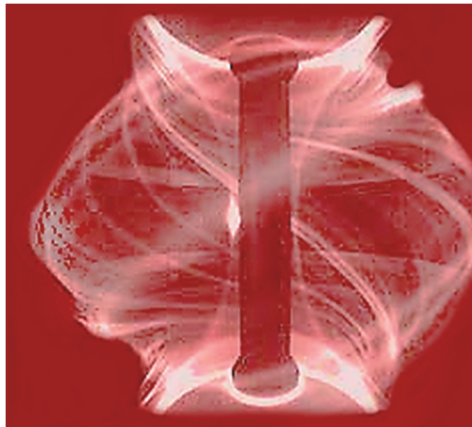


Рис. 2.18. Регистрация высокоскоростной видеокамерой ЭЛМов в токамаке MAST, яркие филаментарные структуры плазмы вытянуты вдоль магнитного поля

При некоторых режимах такие струи горячей плазмы могут переноситься через всю зону СОЛ и достигать первой стенки. H-режим с ЭЛМами ожидается в ИТЭР.

Неустойчивости с ЭЛМами подразделяются на несколько типов:

- ЭЛМы типа I, в таком режиме частота повторения (около 100 Гц) ЭЛМов увеличивается с увеличением мощности нагрева. В этом случае условия в краевой плазме близки к пределу стабильности по значению нормированного градиента давления;

- ЭЛМы типа II, в таком режиме они становятся более частыми (до 1 кГц), а величина интенсивности импульсов излучения D_α уменьшается.

- ЭЛМы типа III, в таком режиме частота повторения ЭЛМов уменьшается с увеличением мощности нагрева, в отличие от ЭЛМов типа I. Градиент давления на границе плазмы не достигает предела по развитию идеальных баллонных мод.

Наблюдаются также режимы удержания с уменьшенной амплитудой и подавленной активностью, вызванной спецификой параметров в периферии, получившие название ЭЛМы типа IV, типа V, EDA, I-мода, (*Grassy*) и QH.

Работа в H-режиме с подавленной активностью ЭЛМов является одним из предпочтительных кандидатов для обеспечения хорошего удержания с низким содержанием примесей без высокой пиковой тепловой нагрузки на дивертор в ИТЭР.

Механизмы возбуждения ЭЛМов связаны с развитием двух неустойчивостей в периферийной зоне разряда – баллонных мод и пилинг мод.

Баллонная мода имеет короткую длину волны, перпендикулярную линиям магнитного поля, и большую длину волны, параллельную им, рис. 2.19. Она дестабилизируется, когда градиент давления превышает критическое значение, но имеет тенденцию стабилизироваться плотностью тока. В частности, достаточно высокая плотность тока полностью стабилизирует баллонный режим, позволяя неограниченно увеличивать градиент давления (без учета влияния других видов неустойчивости).

Второй тип неустойчивости, пилинг-мода дестабилизируется плотностью тока на краю плазмы, но стабилизируется там градиентом давления. Она связана с винтовой неустойчивостью. Эта мода сильно локализована и влияет только на весьма небольшую область транспортного барьера, очень близко к краю плазмы. При высоком градиенте давления пилинг-мода и баллонная мода объединяются, обеспечивая сильную нестабильность, что влияет на всю область транспортного барьера. В результате, ЭЛМы запускаются дестабилизацией объединенных пилинг и баллонной мод.

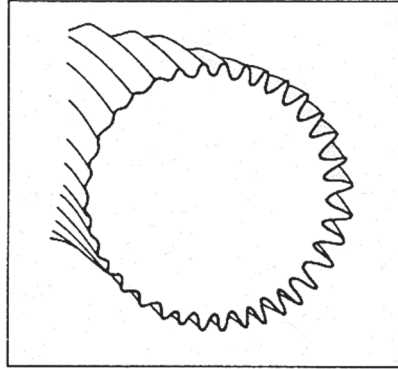


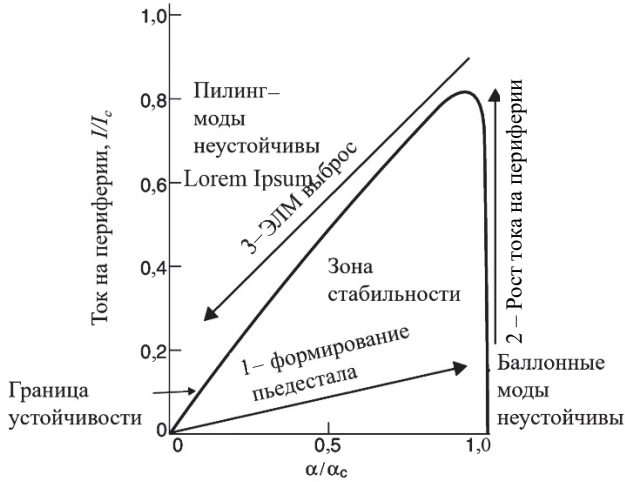
Рис. 2.19. Смещения плазмы при развитии баллонной неустойчивости на периферии

Стабильность при баллонной неустойчивости часто характеризуется параметром стабильности α , определяемым как

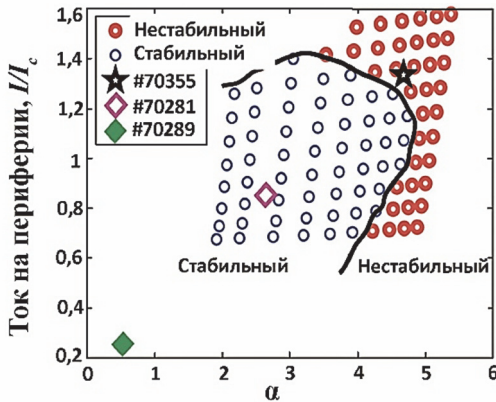
$$\alpha = -\frac{2\mu_0 R q^2}{B^2} \frac{dp}{dr}.$$

Стабильность при баллонной неустойчивости также зависит от магнитного шира s , который оказывает (в области стабильности) стабилизирующий эффект. Это происходит потому, что сдвиг линий магнитного поля препятствует перемещению возмущенной зоны радиально наружу по поверхностям магнитного потока. Поскольку s изменяется в зависимости от формы плазмы, следовательно, на стабильность баллонной неустойчивости могут влиять такие величины, как треугольность плазмы и вертикальное удлинение.

Диаграмма устойчивости режимов в s - α пространстве показана на рис. 2.20. Пример диаграммы стабильности для токамака JET на основе экспериментальных данных представлен рис. 2.20б.



а)



б)

Рис. 2.20. Диаграмма стабильности в пространстве нормированного периферийного тока, связанного с широм магнитного поля, и параметра стабильности α , показывающего порядок событий, прогнозируемых циклом развития пилинг и баллонных неустойчивостей при ЭЛМах (а); диаграмма стабильности для токамака JET в разрядах с ЭЛМами (б)

Неустойчивости ЭЛМов остаются одной из самых острых проблем для ИТЭР, так как высокая тепловая нагрузка ЭЛМов на диверторные пластины будет приводить к значительной эрозии пластин дивертора. На рисунке 2.21 показаны результаты расчетов температуры и концентрации плазмы в ИТЭР при ЭЛМах, показывающих большие значения параметров плазмы в зоне контакта с пластинами дивертора, что может вызывать их эрозию.

Интенсивность ЭЛМов может быть частично подавлена дополнительными магнитными полями в зоне сепаратрисы, на современных токамаках проводятся экспериментальные исследования такого эффекта.

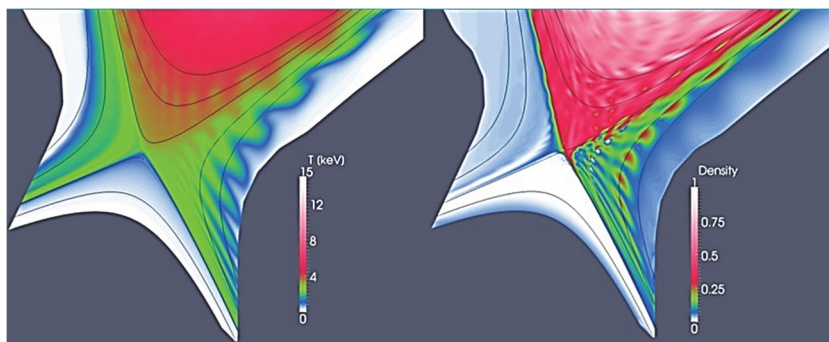


Рис. 2.21. ЭЛМы в ИТЭР: результат расчета распределения температуры и плотности плазмы в диверторной и пристеночной зоне

2.2.14. Диаграмма Хьюгилла стабильных режимов

В результате исследования режимов удержания в токамаке в многочисленных экспериментах и обобщении теоретического рассмотрения МГД процессов, были определены предельные параметры, ограничивающие допустимые значения тока и плотности плазмы. Интегрально такие результаты суммируются на диаграмме Хьюгилла, представленной на рис. 2.22, в координатах плотности и тока плазмы в токамаке. На диаграмме Хьюгилла используются безразмерные координаты – безразмерный ток

$$q_a = \frac{aB_t}{RB_p} = \frac{aB_t}{R\mu_0 I / 2\pi a} = \frac{2\pi a^2 B_t}{\mu_0 I R},$$

$$\frac{1}{q_a} = \frac{I}{2\pi a^2 B_t / \mu_0 R} = \frac{I}{\bar{I}}$$

и число Мураками:

$$M = \frac{\bar{n}R}{B_t}.$$

На диаграмме Хьюгилла область стабильных режимов в токамаке ограничена четырьмя пределами, связанными со следующими процессами, рис. 2.22: генерация убегающих электронов (1), развитие МГД-неустойчивостей и срыва по току – предел по q_a (2), повышенные радиационные потери и срыв по плотности – предел Мураками (3), развитие неустойчивости срыва при превышении критической плотности – предел Хьюгилла, $n_e \sim I_p$ (4).

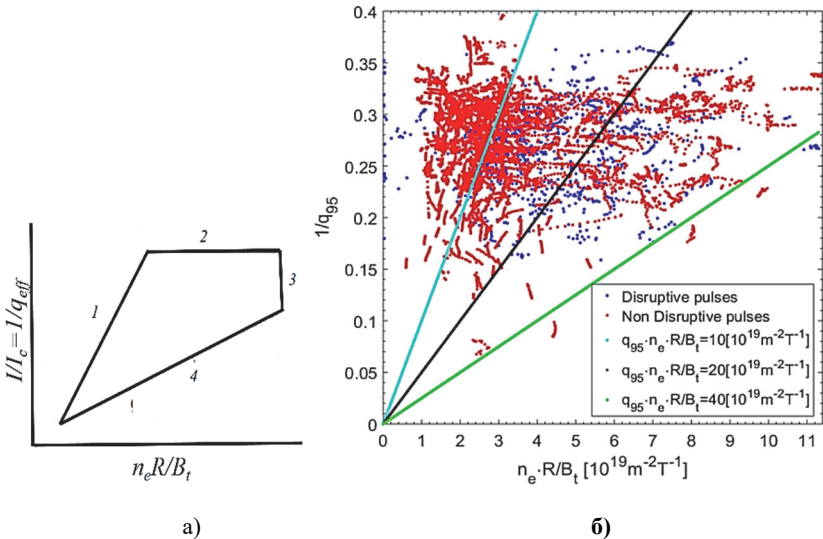


Рис. 2.22. Диаграмма Хьюгилла: область параметров стабильных режимов в токамаке(а); 1 – генерация убегающих электронов; развитие МГД неустойчивостей – предел по току; 3 – большие радиационные потери из-за высокой плотности – предел Мураками; 4 – развитие срыва при высокой плотности – предел Хьюгилла. Стабильные разряды в токамаке JET (б)

Анализ многочисленных экспериментов на многих токамаках подтвердил правильность выбора устойчивых режимов удержания с использованием диаграммы Хьюгилла. Такой подход используется для планирования экспериментов в современных токамаках и будущих реакторах, включая ИТЭР.

2.2.15. Метод расчета параметров токамака – реактора

На основе многочисленных результатов, полученных в экспериментах на токамаках, и теоретических работ по физике плазмы в токамаке разработаны рекомендации по расчету параметров токамака – реактора, в котором будут достигнуты условия зажигания термоядерной реакции. Необходимо использовать выявленные закономерности, называемые скейлингами (см. выше), описывающие взаимосвязь между многими параметрами токамака и характеристиками плазмы в магнитной ловушке.

Основными параметрами токамака являются геометрические характеристики тороидальной плазмы (малый радиус a и аспектное отношение $A = a/R$) и тороидальное магнитное поле B_t . Эти параметры задают не только характеристики удержания плазмы, но также и экономические показатели реактора, так как основная стоимость термоядерного реактора состоит из стоимости камеры реактора и магнитной системы токамака.

Таким образом, выбрав три параметра токамака-реактора (a, A, B_t), другие параметры токамака определяются скейлингами для электронной плотности (концентрации) плазмы n_e , бета β , времени удержания энергии τ_E , тока плазмы, мощности дополнительного нагрева, условий достижения горения термоядерной реакции, обеспечивающих стабильное удержание плазмы. Эксперименты подтвердили эффективность диверторной конфигурации плазмы в токамаке для достижения стабильного удержания плазмы и реализации термоядерной реакции. Диверторная конфигурация характеризуется вертикальным удлинением k_s , треугольностью формы δ , которые также задаются в расчетах и включаются в расчет фактора запаса устойчивости

$$q \equiv \frac{Ka}{R} \frac{B_t}{B_p} = \frac{5K^2 a B_t}{A I_p}, \quad B_p = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi Ka} = \frac{I_p}{5Ka}.$$

Этот параметр используется для вычисления тока плазмы I_p , обеспечивающего стабильность относительно МГД-неустойчивостей

$$I_p = \frac{5K^2 a B_t}{A q_I},$$

где $K^2 = (1 + k_s^2)/2$, I_p в МА, B_t в Тл, a в м.

Значение фактора запаса устойчивости на границе диверторной плазмы задается значением q_{95} , см. выше

Концентрация электронов n_e (в среднем по объему) в стабильном разряде в реакторе ограничена в соответствии с пределом Гринвальда:

$$n_{20} = N_G \frac{I_p}{\pi a^2},$$

где N_G – нормированная плотность Гринвальда, n_{20} – в 10^{20} м^{-3} .

Значение бета горячей плазмы с учетом продуктов термоядерной реакции

$$\beta_{th} \equiv \frac{\langle p \rangle}{B_t^2 / 2\mu_0} = 0,0403(1 + f_{DT} + f_{He} + f_I) \frac{\langle n_{20} T \rangle}{B_t^2},$$

где T – температура плазмы, кэВ, (предполагая $T_i = T_e$); усреднение $\langle \dots \rangle$ проводится по объему плазмы.

Значение бета горячей плазмы выражается через полную бета

$$\beta_{th} = f_{th} \beta_{total}, \quad \beta_{total} = 0,01 \beta_N \frac{I_p}{a B_t},$$

где β_N – нормированная бета в соответствии с критерием Тройона, β_{total} – сумма β_{th} (горячей плазмы) и β_{fast} (быстрых α -частиц), $f_{th} = \beta_{th}/\beta_{total}$, f_{DT} , f_{He} , f_I – отношения плотности ДТ топлива, He и примесей к плотности электронов соответственно.

Тепловая энергия плазмы определяется значением бета горячей плазмы и тороидального магнитного поля:

$$W_{th} = \frac{3}{2} \beta_{th} \frac{B_t^2}{2\mu_0} V = 0,5968 \beta_{th} B_t^2 V,$$

где W_{th} в МДж, объем плазмы V в м^3 .

2.2.16. Параметры токамака-реактора ИТЭР

На основе эмпирических скейлингов (см. предыдущий раздел) проведены расчеты параметров токамака-реактора ИТЭР. Для обеспечения времени удержания энергии и условий термоядерного горения в ИТЭР выбраны (табл. 2.2): радиус плазмы a и характеристики диверторной геометрии, коэффициент удлинения k_s и треугольность δ , тороидальное магнитное поле B_t и аспектное соотношение A , рассчитаны электронная плотность, бета, ток плазмы. Для расчета параметров ИТЭР (см. предыдущий раздел) приняты: $\alpha_T = 1,0$, $\alpha_n = 0,1$, $f_{He} = 0,04$, $f_I = 0,02$. Рассчитанные параметры ИТЭР приведены в табл. 2.3. Эти параметры планируется достичь в ИТЭР, они приняты для разработки конструкций и сооружения систем ИТЭР.

В ИТЭР будут проведены несколько серий проведения эксперимента. Планируются эксперименты с индуктивной и неиндуктивной работой. Поэтому в табл. 2.4 приведены параметры плазмы для этих двух стадий работы.

Таблица 2.3

Параметры для расчета реактора ИТЭР

a	B_t	A	q_{95}	κ_s	δ	f_{rad}	f_α	β_N/f_{th}	N_G	f_{DT}	f_{shape}	H_{y2}
2,0	5,3	3,1	3,0	1,7	0,35	0,27	0,95	1,77/0,928	0,85	0,82	0,995	1,05

Таблица 2.4

Параметры токамака-реактора ИТЭР в режимах работы с индуктивным и неиндуктивным поддержанием тока

Параметр	Индуктивный	Неиндуктивный
I_p , МА	15	9
B_t , Тл	5,3	5,17
R/a , м/м	6,2/2,0	6,35/1,84
A	3,1	3,45
κ_{95}/δ_{95}	1,7/0,33	1,84/0,41
$\langle n_e \rangle$, 10^{20} м^{-3}	1,01	0,67

Параметр	Индуктивный	Неиндуктивный
n_G	0,85	0,83
$0,5 (T_e + T_i)$, кэВ	8,5	~11
$W_{thermal}/W_{fast}$, МДж	325/25	273/60 ÷ 255/50
τ_E , с	3,7	2,54÷2,32
$H_{y2} = \tau_E/\tau_E^{IPB98y2}$	1,0	1,41÷1,3
P_{fus} , МВт	410	361÷338
P_{aux} , МВт	41	PNB=34, PLH=29~33
P_{rad} , МВт	48	–
Z_{eff}	1,65	2,2÷2,7
β_t , %	2,5	2,64÷2,42
β_p	0,67	3,55÷3,26
β_N	1,77	2,8÷2,56
q_{95}	3,0	5,16÷5,13
q_I	2,22	3,44
l_i	0,86	2,2÷2,17
Q	10	5
f_R	0,39	–
f_{DT}/f_{He} , %	82/4,1	–

Контрольные вопросы и задания

1. Кто предложил схему токамака и разработал теоретические основы магнитного термоядерного реактора?
2. Как генерируется и удерживается плазма в токамаке?
3. Опишите схему токамака с дивертором.
4. Какие современные токамаки используют сверхпроводящие магнитные катушки?
5. Опишите магнитную структуру токамака и траектории движения частиц в магнитном поле токамака.
6. Из какого материала изготавливают вакуумную камеру токамака?
7. Из какого материала изготавливают внутрикамерные элементы токамака?
8. Как обеспечивается стабилизация магнитогидродинамических неустойчивостей в токамаке и устойчивость относительно вертикального смещения?
9. Опишите схему проведения экспериментов на токамаке.

10. Какие меры предпринимаются для минимизации поступления примесей со стенки камеры токамака?
11. Как формируется плазма и генерируется тороидальный ток в токамаке?
12. Как создается удлиненная форма плазмы токамака?
13. Как происходит завершение плазменного разряда в токамаке?
14. Какие характеристики используются для описания сложной геометрии токамака с диверторной конфигурацией?
15. Какие параметры и механизмы обеспечивают определяющую роль в переносе заряженных частиц плазмы из разряда на поверхность?
16. Какие параметры плазмы достигнуты в современных токамаках?
17. Какие диагностики необходимы для управления и исследования плазмы в токамаке?
18. Какие параметры можно измерить с использованием магнитных зондов и диагностических витков в токамаке?
19. Каким способом можно оценить проводимость плазмы и среднюю по профилю электронную температуру?
20. Для чего используют наборы магнитных зондов, называемых катушками Мирнова?
21. Какие неустойчивости, возникающие в токамаке, наиболее опасны?
22. Опишите энергетический источник крупномасштабных магнитогидродинамических неустойчивостей.
23. Какие безразмерные величины используют для описания плазмы в токамаке?
24. Сформулируйте предел устойчивости плазмы в токамаке по бета.
25. Сформулируйте предел устойчивости плазмы в токамаке по плотности – предел по Гринвальду.
26. Сформулируйте предел устойчивости плазмы в токамаке по параметру запаса устойчивости – критерий Крускала–Шафранова.
27. Какие неустойчивости ограничиваются изменением шага винта магнитных линий–широм магнитного поля?
28. Какой радиальный профиль тока в токамаке обеспечивает равновесие относительно идеальных винтовых неустойчивостей?

29. Опишите механизм неустойчивости внутреннего срыва по Б.Б. Кадомцеву.

30. Сформулируйте верхний предел значения β_c (критическое значение бета) для стабильного разряда – критерий Тройона.

31. Опишите неустойчивость – большой срыв.

32. Какие меры предлагаются для ограничения условий развития большого срыва в токамаке?

33. Какие механизмы и неустойчивости приводят к аномальному переносу плазмы поперек магнитного поля?

34. Опишите схему переноса потоков тепла и частиц (ионов и электронов) из центральной плазмы к стенке.

35. При превышении какой величины Z_{eff} (эффективного значения зарядового состояния ионов) самоподдерживающаяся реакция синтеза ядер в плазме не может быть реализована?

36. Какие негативные последствия возникают при взаимодействии горячей плазмы с материалами стенки и обращенных к плазме внутрикамерных компонентов?

37. Какие кинетические неустойчивости наблюдаются в токамаках?

38. Опишите режимы удержания плазмы в токамаке: L-режим и H-режим.

39. Опишите методы неиндуктивной генерации тока в плазме токамака.

40. Опишите явление бутстрэп-тока в плазме токамака.

41. Опишите неоклассические тиринг-моды.

42. При каких условиях возникают неустойчивости краевой плазмы – ЭЛМы?

43. Какие негативные последствия развития ЭЛМов?

44. Опишите диаграмму Хьюгилла для стабильных разрядов в токамаке.

45. Какой метод применяется для расчета параметров токамака-реактора?

46. Опишите метод расчета параметров токамака-реактора.

47. Перечислите основные параметры токамака-реактора ИТЭР.

Список рекомендуемой литературы

1. Арцимович, Л.А. Управляемые термоядерные реакции / Л.А. Арцимович. – М.: Физматлит, 1963.
2. Кадомцев, Б.Б. Коллективные явления в плазме / Б.Б. Кадомцев. – М.: «Наука», 1988.
3. Мирнов, С.В. Физические процессы в плазме токамаков / С.В. Мирнов. – М.: Атомэнергоиздат, 1983.
4. Миямото, К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза: пер. с англ. В.Д. Шафранова / К. Миямото. – М.: Физматлит, 2007.
5. Физико-технические проблемы управляемого термоядерного синтеза / под ред. А.В. Дедова. – LAP Lambert Academic Publishing, 2018.

II. СТРУКТУРА И СОСТАВ ИТЭР

Глава 3. Историческая справка

3.1. История проекта ИТЭР

Проект международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР был запущен на Женевском саммите сверхдержав в ноябре 1985 г., когда руководитель СССР М.С. Горбачев предложил президенту США Р. Рейгану идею совместного международного проекта по разработке термоядерной энергии в мирных целях (рис. 3.1). Советскими учеными во главе с академиком Евгением Павловичем Велиховым была предложена концепция токамака для реализации термоядерного реактора, поскольку к тому времени на токамаках были достигнуты существенные успехи, в том числе в токамаке Т-4 (СССР) были впервые получены нейтроны термоядерной реакции.



Рис. 3.1. Руководитель СССР М.С. Горбачев и президент США Р. Рейган на Женевском саммите сверхдержав (1985) (начало международных усилий по решению проблемы УТС)

Год спустя было достигнуто соглашение: Европейские страны (входящие в объединение Евроатом), Советский Союз, США и Япония совместно займутся проектированием крупной международной термоядерной установки ИТЭР. Работа по концептуальному проектированию началась в 1988 г., за ней последовали все более детальные этапы инженерного проектирования, пока окончательный проект ИТЭР не был одобрен членами проекта в 2001 г. Китайская Народная Республика и Республика Корея присоединились к проекту в 2003 г., за ними в 2005 г. последовала Индия. Выбор места для ИТЭР был длительной процедурой, которая была завершена в 2005 г., когда члены ИТЭР единогласно согласились с местом, предложенным Европейским союзом. Установка ИТЭР сооружается недалеко от Экс-ан-Прованса на юге Франции.

Дальнейшие переговоры привели к заключению Соглашения по проекту ИТЭР (*ITER Agreement*), в котором подробно описывались этапы строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации, а также финансирование, организация и укомплектование персоналом организации ИТЭР.

На церемонии в Париже Соглашение по проекту ИТЭР было официально подписано в Елисейском дворце в Париже 21 ноября 2006 г. министрами семи стран-участниц ИТЭР (рис. 3.2); этим документом была учреждена юридическая международная организация, ответственная за строительство, эксплуатацию и вывод из эксплуатации реактора ИТЭР. После ратификации международного договора всеми членами Организация ИТЭР была официально учреждена 24 октября 2007 г.

Первые команды прибыли на место в Сен-Поль-ле-Дюранс вблизи Экс-ан-Прованса на юге Франции в конце 2005 г. после принятия решения об этом месте строительства ИТЭР. С этого момента и до начала строительства здания в 2010 г. штат был увеличен примерно до 500 человек, был начат процесс лицензирования ядерной деятельности; были проведены подготовительные работы на площадке и созданы агентства в каждом государстве-участнике ИТЭР (национальные агентства).



Рис. 3.2. Подписание межправительственного Соглашения по проекту ИТЭР в Париже 21 ноября 2006 г.

Сегодня тысячи людей сотрудничают на площадке ИТЭР в Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция, а также в Европейском союзе, Индии, Китае, Корее, России, Соединенных Штатах и Японии над созданием токамака ИТЭР, самого совершенного в мире термоядерного эксперимента с магнитным удержанием плазмы в токамаке.

3.2. Цели проекта ИТЭР

Проект международного токамака-реактора ИТЭР имеет следующие цели:

– достичь выделения 500 МВт термоядерной мощности при вложенной 50 МВт электрической мощности, затрачиваемой на поддержание плазмы (коэффициент усиления $Q = 10$) в режиме индукционного возбуждения тока в течение 400 с;

– предпринять усилия по осуществлению режима с неиндукционным поддержанием тока в течение 3000 с при коэффициенте усиления $Q = 5$;

- продемонстрировать работоспособность существенных для реактора технологий;
- начать испытания материалов будущих энергетических термоядерных реакторов.

3.3. Состав систем ИТЭР

Токамак ИТЭР (рис. 3.3 и 3.4) состоит из следующих систем:

- вакуумная разрядная камера с внутрикамерными компонентами облицовки первой стенки, дивертора, blankets, с нейтронной защитой;
- сверхпроводящая магнитная система тороидального и полоидального магнитного поля;
- криовакуумная система;
- система нагрева плазмы;
- система охлаждения;
- топливная система реактора;
- криогенный комплекс;
- электротехнический комплекс и системы питания;
- диагностики плазмы.

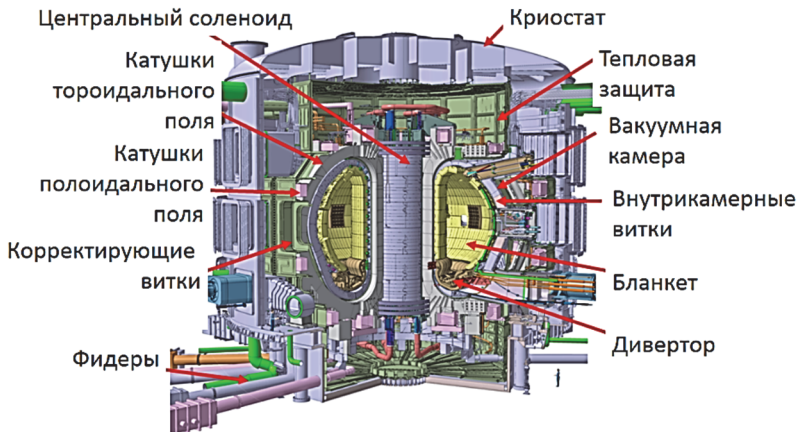


Рис. 3.3. Токамак ИТЭР, общий вид

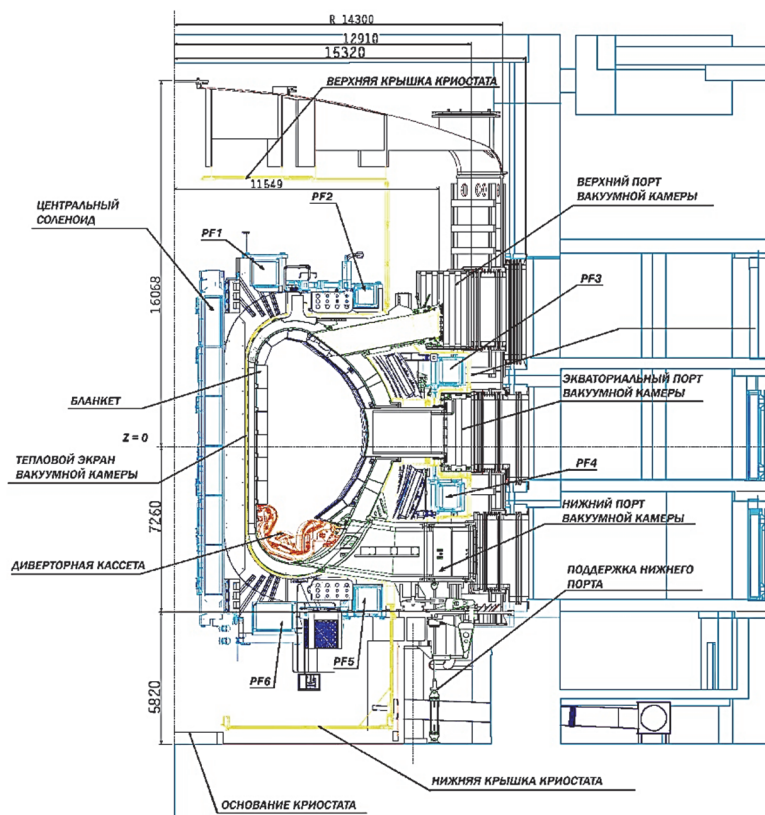


Рис. 3.4. Токамак ИТЭР, полоидальное сечение

При проектировании ИТЭР необходимо:

- оптимизировать конструкцию (дизайн) для целей первого этапа активной эксплуатации и обеспечить возможности реализации задач последующих этапов;
- в рамках предоставленных ресурсов максимально ускорить разработку базовых конструкций токамака и отложить разработку внешних систем, которые могут быть изменены или добавлены позже;
- использовать передовые, но проверенные технологии, при этом сохранять гибкость для внедрения новых технологий, когда они будут проверены;

- избегать необратимых решений, если они могут быть сделаны позже, когда будет доступна более подробная информация о токамаке;
- для систем, которые будут разработаны и спроектированы позже, резервировать максимальное доступное пространство в токамаке и помещениях;
- по возможности избегать производства и тестирования на месте сборки;
- никогда не ставить под угрозу безопасность работы токамака для повышения производительности или снижения затрат;
- компоненты, обращенные к плазме, должны быть исключены из функций безопасности;
- при проектировании особое внимание уделяется безопасности;
- максимизировать простоту, отказоустойчивость конструкции, избыточность и разнообразие (где это уместно), независимость и возможность тестирования.

3.4. План исследований на ИТЭР

План исследований на ИТЭР определяет стратегию достижения целей, определенных в специальном документе Стратегия плана исследований ИТЭР (*The ITER Research Plan strategy*). Эта стратегия требует наличия токамака и вспомогательных систем, установленных в рамках поэтапного подхода. Этот документ описывает общий график постройки и ввода в эксплуатацию систем установки ИТЭР и исследовательские мероприятия, предусмотренные для каждого этапа при достижении основных эксплуатационных целей, включая плазменные сценарии, которые будут разработаны.

Стратегия плана исследований ИТЭР была разработана в соответствии с последовательностью установки компонентов токамака и вспомогательных систем вплоть до завершения базовой конфигурации ИТЭР. Этот план может быть скорректирован при появлении новых экспериментальных данных на современных токамаках и при оптимизации технологий сборки систем ИТЭР.

План исследований на ИТЭР разделен на три основных этапа.

Этап 1. Первая плазма (FP – *First Plasma*): включает комплексный ввод в эксплуатацию основных систем, получение первой плазмы в токамаке и инжиниринг. Будут получены разряды с пробоем плазмы в водороде или гелии при токе плазмы не менее 100 кА в течение не менее 100 мс. В течение последующего этапа инженерной эксплуатации будет введена в эксплуатацию магнитная система, чтобы можно было получить плазму круглого сечения с лимитером с током до 1 МА. Эксплуатационная кампания, как ожидается, продлится 18 месяцев.

Этап 2. Предварительная работа с термоядерной плазмой (PFPO – *Pre-Fusion Operation*): этот этап разделен на две кампании PFPO-1 (18 месяцев) и PFPO-2 (21 месяц), в ходе которых будут разработаны сценарии работы с водородной и, возможно, гелиевой плазмой. При выполнении PFPO-2 количество доступных вспомогательных систем и диапазон разрабатываемых плазменных сценариев значительно увеличиваются. На этом этапе будут продемонстрированы плазменные сценарии, использующие эксплуатационные возможности токамака ИТЭР, доведение до его номинальных проектных параметров тока плазмы 15 МА и магнитного поля 5,3 Т, включая использование базового дополнительного нагрева и систем генерации дополнительного тока (H&CD) с доведением их номинальных уровней мощности и длительных импульсов (≥ 100 с).

На стадии PFPO-1 будут проведены работы с диверторной плазмой в водороде/гелии с током и магнитным полем не менее 7,5 МА/2,65 Т, с управлением плазмой, диагностикой, вводом в эксплуатацию систем дополнительного нагрева плазмы методами ЭЦРН и ИЦРН (при условии наличия одной антенны, обеспечивающей нагрев ИЦРН мощностью 10 МВт), а также осуществлена разработка системы смягчения последствий срывов, возможность подготовки к работе при более высоких токах плазмы. Будет определен сценарий работы при тороидальном поле 1,8 Тл, который мог бы обеспечить работу в Н-режиме с установленной мощностью до 30 МВт ЭЦРН + ИЦРН, т.е. этот подход предполагает, что может быть реализована двухчастотная работа гиротронов (104/170 ГГц), на трети от всего количества гиротронов.

На стадии PFPO-2 будут введены в эксплуатацию системы дополнительного нагрева нейтральными пучками (HNB) диагностического нейтрального пучка (DNB) и ИЦРН на полную мощность вместе с возможностями управления плазмой; достигнуты H-режим в разряде на водороде с гелием и надежное управление отводом теплового потока при ЭЛМах. Еще одной ключевой целью будет разработка L-режима высокой мощности для демонстрации всех технических возможностей. В рамках подготовки к ядерной фазе будут проводиться систематические исследования взаимодействия плазмы со стенками, включая эрозию компонентов облицовки камеры, обращенной к плазме, переосаждение, образование пыли, захват рабочего газа в материалах стенки и его удаление. После реализации варианта работы при магнитном поле 1,8 Т, на этом этапе планируется работа в H-режимах в гелии, что обеспечило бы физическую основу для сравнения H-режимов в водородной и гелиевой плазме, что очень важно для достижения H-режимов при более высоких полях. Кроме того, если в PFPO-1 будет достигнута работа в H-режиме при 1,8 Тл, это позволит оценить эффекты трехмерных полей, создаваемых тестовыми модулями бланкета (ТБМ) на этой фазе, путем сравнения плазмы PFPO-1 (без ТБМ) с плазмой PFPO-2 (с ТБМ), а также разработка схем смягчения таких последствий, если потребуется.

Этап 3. Работа с термоядерной плазмой (FPO – *Fusion Power Operation*). На этом этапе будут разработаны сценарии использования дейтерий-тритиевой плазмы для демонстрации целей проекта по зажиганию термоядерной реакции и производству термоядерной энергии. Также будут проведены исследования, способствующие дальнейшему развитию науки и технологий термоядерного синтеза с перспективой разработки демонстрационного термоядерного реактора (ДЕМО). Работы на этом этапе разделены на двухлетние циклы с 16 месяцами плазменных экспериментов, за которыми следуют 8 месяцев технического обслуживания. План исследований на ИТЭР определяет экспериментальную стратегию для первых трех кампаний FPO, которые включают достижение целей по производству термоядерной энергии ИТЭР.

Первоначальной целью на стадии FPO будет демонстрация работы мощных H-режимов в дейтерии для подготовки сценариев плазмы для работы с DT-плазмой; начиная с экспериментов с примесями трития, постепенный переход к полной работе с DT-плазмой будет осуществляться по мере необходимости. Необходимо увеличить производительность тритиевой фабрики по наработке топлива и обеспечения топливного цикла. Целью первой кампании с DT-плазмой будет демонстрация выработки термоядерной энергии в несколько сотен МВт в течение нескольких десятков секунд при значении добротности в диапазоне $5 \div 10$. В последующих экспериментальных кампаниях коэффициент усиления термоядерного синтеза будет оптимизирован для достижения $Q \approx 10$, длительность импульса в сценариях с индуктивной плазмой будет увеличена до $300 \div 500$ с, будут разработаны гибридные и полностью неиндуктивные сценарии для достижения длительности термоядерного горения в диапазоне $1000 \div 3000$ с при $Q \sim 5$.

Контрольные вопросы и задания

1. Кто предложил идею совместного международного проекта по разработке термоядерной энергии в мирных целях?
2. Какая концепция предложена для реализации международного термоядерного реактора ИТЭР?
3. Назовите страны, принимающие участие в проекте ИТЭР.
4. Где сооружается ИТЭР?
5. Какие цели имеет проект международного токамака-реактора ИТЭР?
6. Какой состав систем ИТЭР?
7. Назовите принципы, которые были приняты при проектировании ИТЭР.
8. Опишите план исследований ИТЭР.
9. Какие параметры будут достигнуты на первом этапе исследований на ИТЭР?

10. Какие параметры будут достигнуты на втором этапе исследований на ИТЭР?

11. Какие параметры будут достигнуты на третьем этапе исследований на ИТЭР?

12. Какие режимы будут продемонстрированы на третьем этапе исследований на ИТЭР?

13. Какая мощность дополнительного нагрева будет использоваться на третьем этапе исследований на ИТЭР?

14. Какое значение усиления мощности Q будет достигнуто на третьем этапе исследований на ИТЭР?

15. Какая длительность разряда будет достигнута на первом этапе исследований на ИТЭР?

Список рекомендуемой литературы

1. Мирнов, С.В. Энергия из воды / С.В. Мирнов. – М.: МИФИ, 2007.
2. Макаров, А.А. Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство / А.А. Макаров. – М.: Энергоиздат, 1997.
3. Голубчиков, Л.Г. ИТЭР. Решающий шаг / Л.Г. Голубчиков. – М.: МИФИ, 2004.

Глава 4. РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА

Разрядная вакуумная камера (ВК) состоит из основной вакуумной камеры, портов и системы поддержки ВК (см. рис. 4.1).

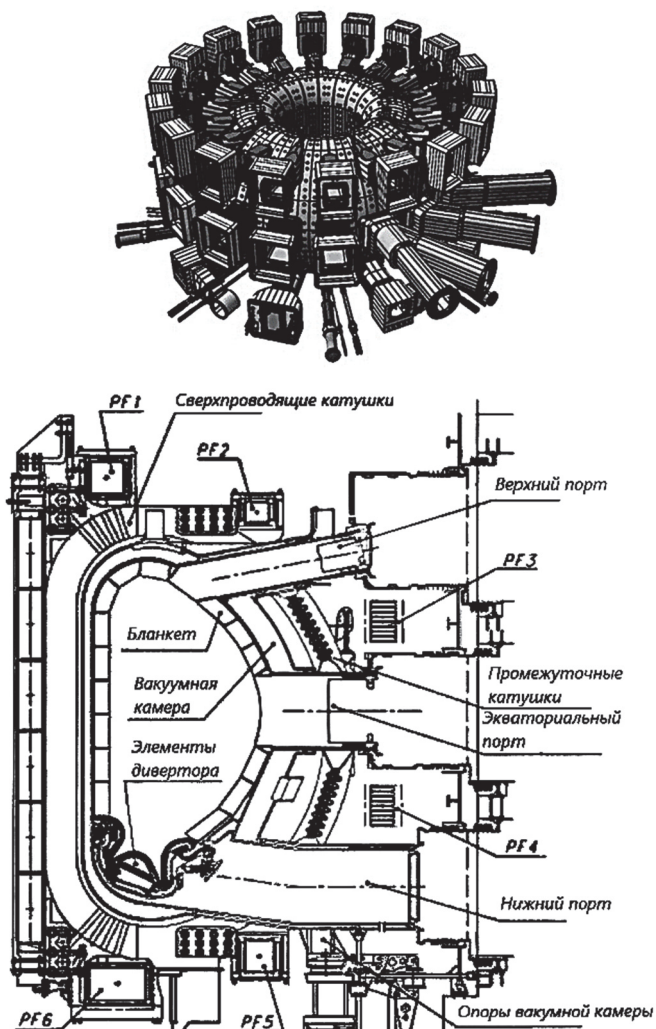


Рис. 4.1. Общий вид вакуумной камеры и полоидального поперечного сечения токамака

Вакуумная камера представляет собой конструкцию с двойными стенками в форме тора, охлаждаемую водой, циркулирующей между оболочками (стенками) (рис. 4.2).

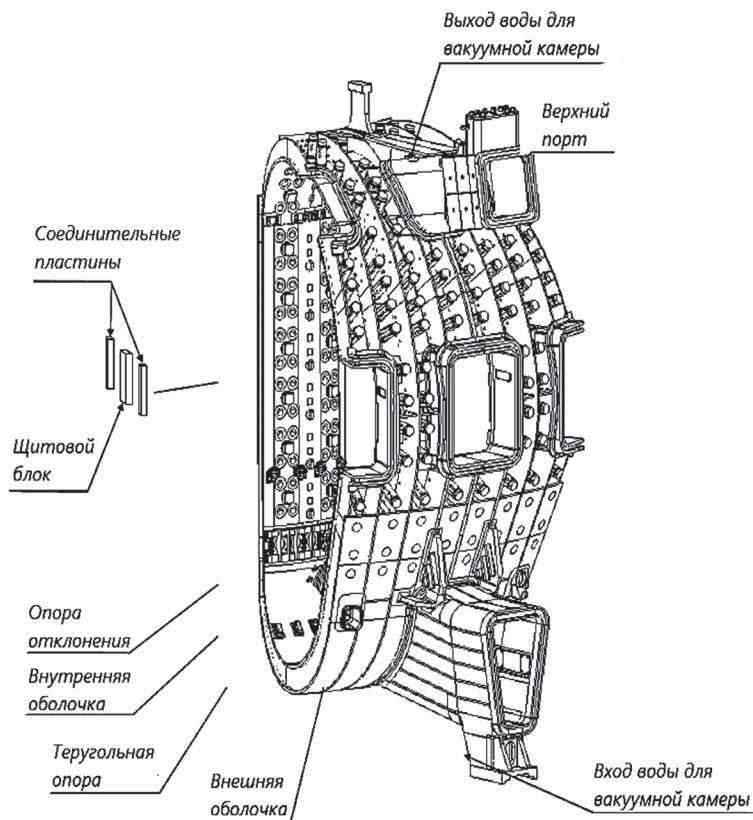


Рис. 4.2. Общий вид сектора вакуумной камеры

Внутренняя оболочка (стенка) выступает в качестве первичного барьера для радиоактивных материалов, присутствующих в камере. Вакуумная камера разделена на девять тороидальных секторов, соединенных сваркой с использованием соединительных пластин.

Вакуумная камера имеет верхние, экваториальные и нижние порты (герметичные вводы), а также локальные отверстия, расположенные на нижнем уровне (рис. 4.2).

На верхнем уровне расположены 18 одинаковых портов. На экваториальном уровне имеется 14 экваториальных портов и три порта для инъекции нейтрального луча (порты NB). На нижнем уровне расположены пять портов для замены кассет дивертора и диагностики диверторной плазмы, а также четыре порта для вакуумной откачки (порты крионасоса). Между нижними портами имеются локальные отверстия с патрубками для установки технологического оборудования, включая технологические трубопроводы.

Эти отверстия с патрубками используются также для осмотра камеры и очистки компонентов камеры тлеющим разрядом. Основные параметры ВК указаны в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные параметры вакуумной камеры и портов

Параметры	Значения
Количество секций	9
Угловая протяженность секции вдоль тора, градус	40
Наружный (внешний) диаметр тора, м	19,4
Внутренний диаметр тора, м	6,5
Высота тороидальной секции камеры, м	11,3
Толщина оболочки, м	0,06
Общая масса основной камеры, герметичных вводов и экранов, т	5125
Конструкция герметичных вводов (портов)	
Количество верхних портов	18
Габаритные размеры верхних портов (д×в×ш), м	7,2×3,6×2,5
Количество стандартных экваториальных портов	14
Габаритные размеры экваториальных портов с учетом соединительного канала (д×в×ш), м	3,2×3,5×3,1
Количество портов для инъекции нейтронов (нейтральных атомов) (два для Н-NB, еще один, разделяемый для D-NB и Н-NB)	3
Габаритные размеры Н-NB портов, м	9,0×2,7
Количество нижних портов	18
Габаритные размеры нижнего порта (включая соединительные каналы, д×в×ш), м	4,2×2,3×1,5

Параметры вакуумной камеры приведены в табл. 4.2 и на рис. 4.3.

Таблица 4.2

Параметры вакуумной камеры

Параметры	Значения
<p><i>Размеры:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • тороидальная протяженность сектора, °; • тороидальный наружный диаметр, м; • тороидальный внутренний диаметр, м; • тороидальная высота, м; • толщина оболочки, мм; • толщина ребер, мм 	<p>40</p> <p>19,4</p> <p>6,5</p> <p>11,3</p> <p>60</p> <p>40, 60 и 80 в отдельных местах</p>
<p><i>Структура</i></p>	<p>Двойная стенка</p>
<p><i>Конфигурация:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • внутренняя прямая область; • внутренний верх/низ; • область подвеса 	<p>цилиндриче- ская форма двойная кривизна в основном двойная кривизна</p>
<p><i>Электрическое сопротивление:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • тороидальное, мкОм; • полоидальное, мкОм 	<p>7,9</p> <p>4,1</p>
<p><i>Температура воды на входе:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • в штатном режиме, °С; • во время прожига для ВК, °С; • во время прожига для воды охлаждающей порты, °С 	<p>100</p> <p>200</p> <p>240</p>
<p><i>Абсолютное давление воды на входе:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • в штатном режиме работы, МПа; • во время прожига, МПа 	<p>0,8</p> <p>2,1</p>

Параметры	Значения
Абсолютное давление в вакуумной камере при нормальных условиях, МПа	0
Объем охлаждающей жидкости в ВК (во всех 9 секциях), м ³	200
Объем охлаждающей жидкости, включая расширения портов, м ³	35
Объем охлаждающей жидкости в частях расширения портов, м ³	~ 0,142 на 1 верхний порт ~ 0,045 на 1 нижний порт
<i>Проектное значение расчетного давления:</i>	
• на вакуумную камеру и расширения, МПа;	2,6
• на расширения портов охлаждаемые системой охлаждения первой стенки и blankets, МПа	5,0
<i>Охлаждающая жидкость</i>	вода
<i>Проектное значение температуры:</i>	
• для вакуумной камеры, °С;	200
• для портов, °С	250
<i>Площадь поверхности/объем:</i>	
• площадь внутренней поверхности, м ² ;	~ 850
• внутренний объем, м ³ ;	
• исключая объем внутренних элементов, м ³ ;	~ 1090
• включая объем внутренних элементов, м ³	~ 1600
<i>Масса собранной установки:</i>	
• вакуумная камера (без экранов), т;	1611
• экраны, т;	1733
• порты, (без соединительных каналов), т;	1485
• соединительные каналы, т	294
Общая масса, т	5125
Допустимая скорость утечки – испытание на герметичность в гелиевом вакууме, Па·м ³ /с	1·10 ⁻⁷

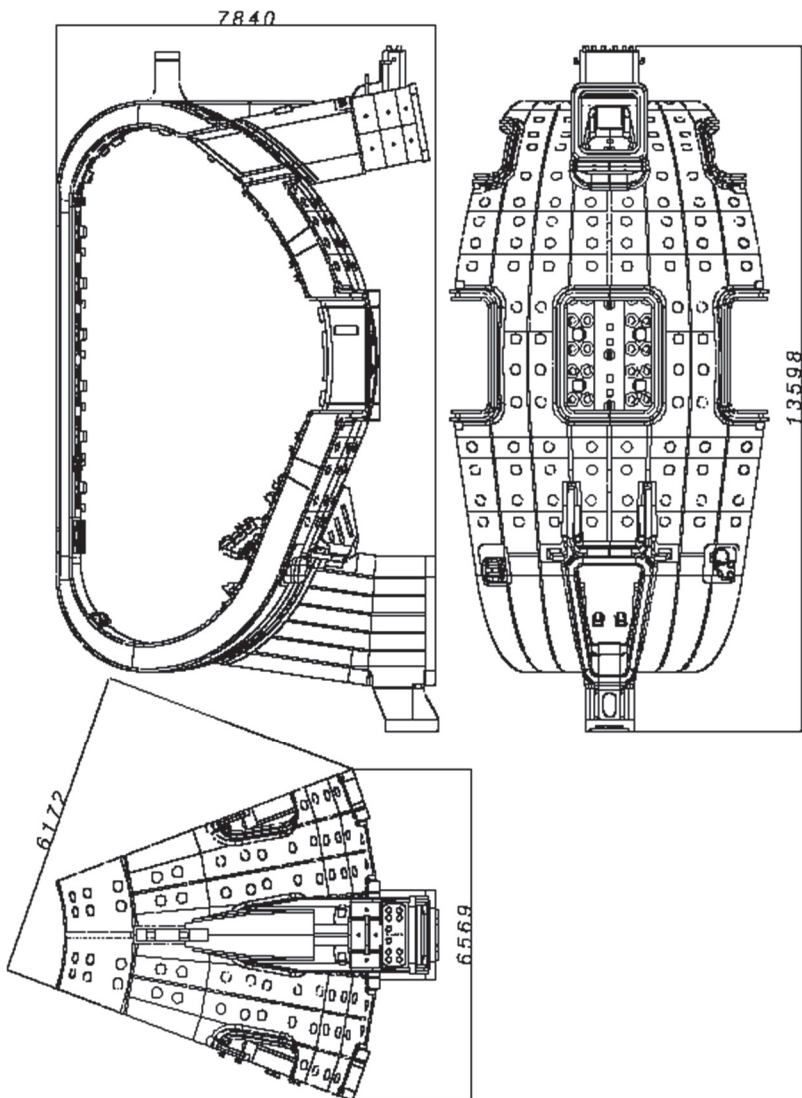


Рис. 4.3. Габаритные размеры основной вакуумной камеры

Выбор материалов вакуумной камеры токамака значительно влияет на стоимость, производительность, ремонтпригодность, лицензирование, параметры проектирования и утилизацию.

Выбор материалов, приведенных в табл. 4.3, основан на их высокой механической прочности при рабочих температурах, коррозионных свойствах, производственными характеристиками и низкой стоимостью по сравнению с другими кандидатами. Пространство между двойными стенками камеры содержит защитные конструкции, в основном изготовленные из аустенитной нержавеющей стали с покрытием бора на $1\pm 2\%$ от общей толщины. Решение о добавлении бора в сталь марки SS304 было принято для повышения эффективности защиты от нейтронов. Ферритная нержавеющая сталь используется в качестве защитного материала под катушками тороидального поля для уменьшения пульсаций тороидального поля. Используемые стали обладают высокой коррозионной стойкостью при контакте с водой и хорошими технологическими характеристиками.

Таблица 4.3

**Материалы, используемые
для изготовления вакуумной камеры**

Материал	Комментарии
<p><i>Основной удерживающий давление и конструкционный материал:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • аустенитная сталь 316L (N)-1G (класс контролируемого азота в RCC-MR с дополнительными требованиями) 	<p>Сталь из RCC-MR, стандарт 2007 г. без EN согласованных стандартов</p>
<p><i>Материал неупакованных компонентов порта, соединительные каналы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • сталь 316L (N)-1G; • сталь 304L (класс EN 1.4307); • сталь 304 (класс EN 1.4301) 	<p>Как указано выше, сталь 1.4301 и 1.4307 соответствуют стандартам EN с дополнительными требованиями, описанными в RCC-MR, стандарт 2007 г.</p>
<p><i>Материал встроенных экранов:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • борированная сталь 304B4 (UNS S30464), 304B7 (UNS S30467); • ферритовая сталь 430 (UNS 43000); • болты XM-19 (B8K) 	<p>Неконструкционные (не удерживающие давление) материалы Стандарты ASTM применяются с дополнительными требованиями ITER</p>

Материал	Комментарии
<p><i>Покрытие:</i> покрытие из чистой меди в некоторых частях вакуумной камеры для пассивной стабилизации плазмы</p>	<p>Неконструкционные (не удерживающие давление) материалы</p>
<p><i>Опоры:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • аустенитная сталь типа 316L (согласно стандартам EN); • скользящие элементы с покрытием 	<p>Неконструкционные (не удерживающие давление) материалы, согласно стандартам EN</p>
<p><i>Болтовые соединения (опоры, фланцы):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • сплав 718 или сталь 660 (согласно стандартам EN) 	<p>Компоненты, не удерживающие давление, согласно стандартам EN</p>

Основная камера

Основная камера представляет собой D-образный тор (рис. 4.3). Основной корпус вакуумной камеры состоит из внутренней и внешней оболочек (стенок), ребер и угловых соединений, корпусов для гибких опор модулей покрытия, треугольных опор модулей покрытия, соединительных пластин, заглушек портов и специальных толстостенных компонентов (таких как диверторные опорные конструкции). Пространство между внутренней и внешней оболочками заполнено встроенным экранированием. Ребра жесткости между оболочками придают необходимую механическую прочность. Внутренняя и наружная оболочки, а также ребра жесткости соединены сваркой. Внутренняя и внешняя оболочки состоят из 60-миллиметровых пластин, а ребра жесткости – в основном из 40-миллиметровых пластин (за исключением 60-миллиметровой пластины для центрального полоидального ребра и 80-миллиметровых пластин в некоторых отдельных областях). Каждый сектор подразделяется на два полусектора. Это разделение обеспечивается герметичным центральным полоидальным ребром.

Тороидальная треугольная опора для нижнего подвешного бланкет-модуля (рис. 4.4) обеспечивает устойчивость плазмы по вертикали (непрерывность в местах стыков обеспечивается

специальными вставками, называемыми съемными частями треугольных опор). Треугольная опора также способствует структурной целостности вакуумной камеры.

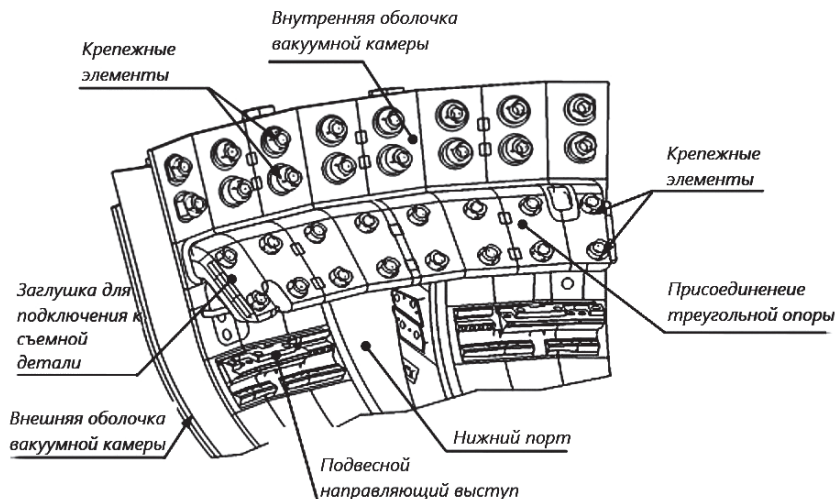


Рис. 4.4. Общий вид элемента тороидальной треугольной опоры

Герметичные вводы-порты

Расположение портов приведено в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Характеристика портов

Тип порта	Число портов
Верхний: – диагностика, ЕС система, вакуумная камера/общий водопроводный трубопровод, устройство	18
Экваториальный: – система нагрева, диагностика, тестирование модуля бланкета; – пучок нейтральных частиц;	14
– нагрев/диагностика пучка нейтральных частиц	2
Нижний: – RH/диагностика, вакуумная/отводящий трубопровод;	1
– крионасосы;	4
– IVV система, вакуумная камера/отводящий трубопровод	5
	18 групп в 9 отсеках

Большинство компонентов каждого порта (рис. 4.5) имеют сдвоенную конструкцию стенок с ребрами жесткости между корпусами.

Некоторые компоненты верхнего и экваториального портов имеют одинарную конструкцию (рис. 4.6 и 4.7).

Удлинители стоек верхнего порта дополнительно оснащены трубами (змеевиками), охватывающими трубопроводы. Концевые части удлинителей портов (соединительные каналы) состоят из более тонких оболочек с усиливающими балками. Концевая часть удлинителя порта оснащена закрывающей пластиной, которая обеспечивает первичную вакуумную герметичность. Заглушки портов и отдельные запорные пластины крепятся к удлинителям портов с помощью обычного фланцевого соединения.

Внутри каждого порта, используемого для пучка нейтральных частиц (рис. 4.8), имеется внутренний канал (вкладыш) для защиты от мощного пучка нейтральных частиц мощность.

В этих портах также используются дополнительные экранирующие компоненты (например, экранирующие вставки). Нижние порты показаны на рис. 4.9.

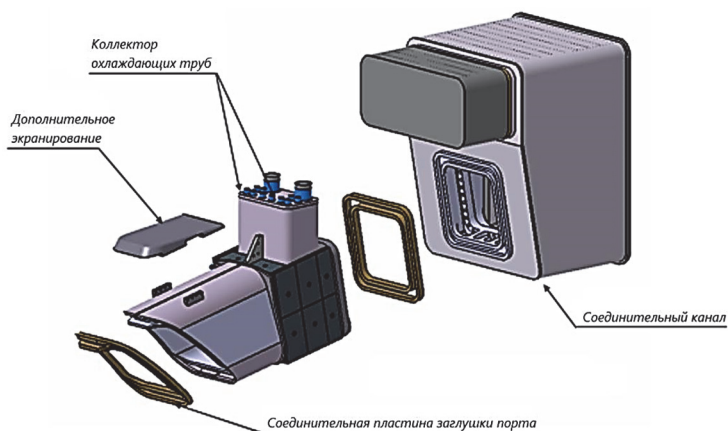


Рис. 4.5. Верхний порт

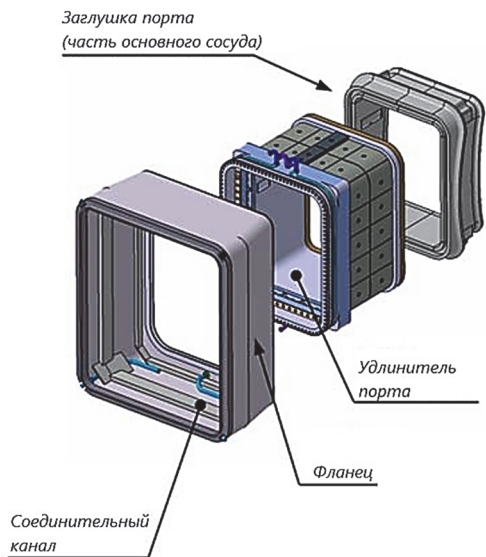


Рис. 4.6. Экваториальный порт

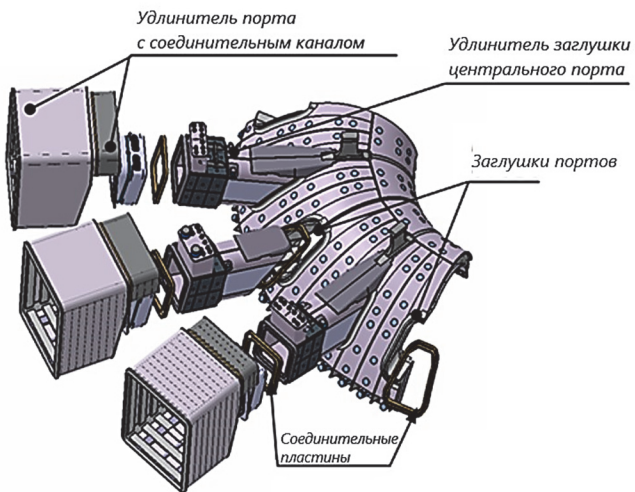


Рис. 4.7. Изометрический вид верхних портов



Рис. 4.8. Порт инжектора нейтральных пучков

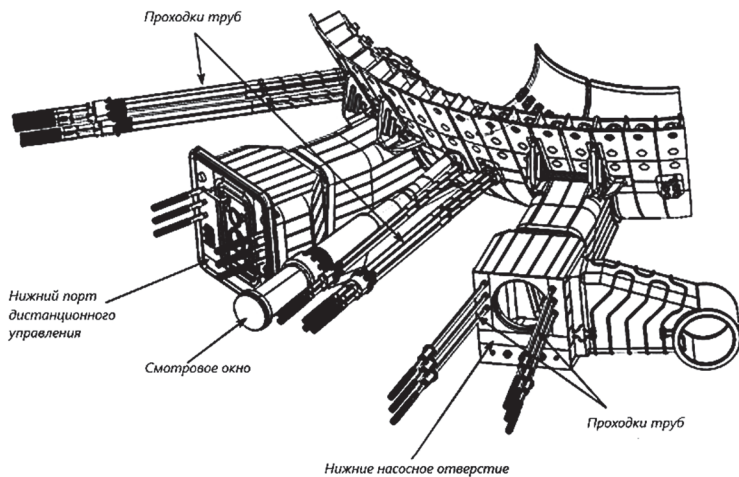


Рис. 4.9. Нижний порт с вводами

Изготовление вакуумной камеры

Вакуумная камера изготавливается на заводе в виде девяти секторов, каждый из которых охватывает 40° . Схема поэтапного изготовления секторов показана на рис. 4.10.

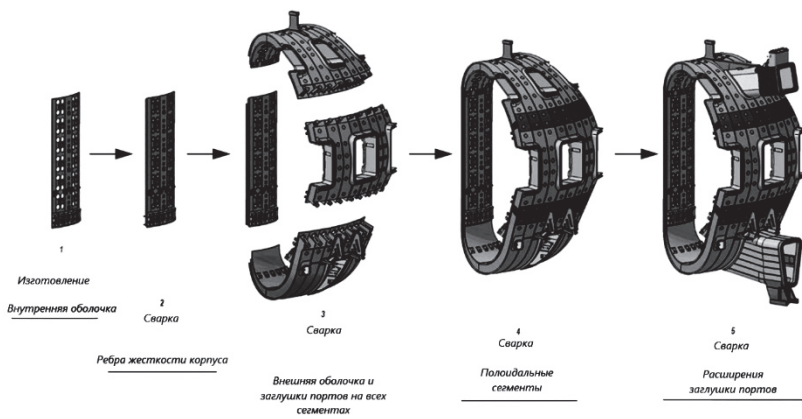


Рис. 4.10. Схема поэтапного изготовления секторов вакуумной камеры

Испытания вакуумной камеры

Полномасштабная модель сектора ВК была изготовлена и протестирована с контролем величины сварочных искажений и достижимых допусков.

Для сварки секторов использовались автоматические сварочные аппараты TIG, установленные на направляющих рельсах для создания сварного шва между двумя полусекторами. Выравнивание стыкового сварного соединения наружной обечайки было выполнено путем регулировки положения секторов и локального закрепления обечайки домкратом перед сваркой. Зазор устанавливался с точностью 0,8 мм.

Был изготовлен полномасштабный экваториальный порт, который был соединен с полномасштабным сектором ВК. После соединения этого порта был проведен ультразвуковой контроль с использованием роботов с дистанционным управлением.

Большинство сварных швов во внутренней оболочке исследованы с помощью рентгенографии или ультразвукового контроля для обеспечения 100% эффективности сварки.

Проведены теплогидравлические испытания ВК с целью продемонстрировать охлаждение с естественной циркуляцией во время событий с высокими тепловыми нагрузками на стенку и обеспечивать коэффициент теплопередачи не менее $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Результаты испытаний подтвердили проектную производительность системы охлаждения ВК.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные элементы разрядной вакуумной камеры.
2. Какую основную функцию выполняет внутренняя оболочка вакуумной камеры?
3. Какое количество тороидальных секторов в нынешней конструкции реактора ИТЭР? Каким образом выполняется их соединение?
4. Каковы примерные габаритные размеры разрядной вакуумной камеры?
5. Перечислите материалы, используемые для изготовления вакуумной камеры.
6. Какие элементы разрядной вакуумной камеры изготавливаются из сталей типа 316L, 304L?
7. С какой целью в корпусе вакуумной камеры расположены локальные отверстия с патрубками и технологические трубопроводы?
8. С какой целью в корпусе вакуумной камеры предусмотрены герметичные вводы (порты)?
9. Какой тип вакуумных насосов используется для создания необходимого значения вакуума в камере?
10. Перечислите материалы, используемые в качестве основных конструкционных материалов при изготовлении разрядной вакуумной камеры.
11. Назовите основные элементы, из которых состоит порт инжектора нейтральных пучков.

12. Какие элементы разрядной вакуумной камеры изготавливаются из ферритовой стали 430?
13. Опишите технологический процесс изготовления вакуумной камеры.
14. Как осуществляется процедура проверки вакуумной камеры?
15. Назовите способы контроля качества поверхности вакуумной камеры.

Список рекомендуемой литературы

1. Андрюшин, И.А. Мир на пороге XXI века / И.А. Андрюшин, А.К. Чернышев, Ю.А. Юдин; под ред. В.Н. Михайлова. – Саров, 2001.
2. Евтихин, В.А. Дивертор термоядерного реактора ТОКАМАКА: Патент № 2051430 / В.А. Евтихин, Л.Г. Голубчиков. – 1996 г.
3. ITER Physics Basis, Editors / F.W. Perkins, D.E. Post, N.A. Uckan et al. // Nuclear Fusion, IAEA, Vienna. – 1999. – № 12, 2137. – Vol. 39.

ГЛАВА 5. ПЕРВАЯ СТЕНКА, БЛАНКЕТ, ДИВЕРТОР, НЕЙТРОННАЯ ЗАЩИТА

5.1. Общее описание системы blankets

Система blankets обеспечивает физическую границу для плазменного разряда и способствует тепловой и ядерной защите вакуумной камеры (ВК) и внешних компонентов установки.

Система blankets состоит из модульных экранирующих элементов, известных как модули blankets (МБ), которые крепятся к вакуумной камере. Модули blankets состоят из обращенной к плазме панели первой стенки (ПС), установленной на блоке защиты (БЗ).

Катушки с вертикальной стабилизацией (ВС) и краевой локализацией (ЭЛМ) установлены тороидально и полоидально в зазоре между модулями blankets. Подвесной общий коллектор установлен поверх катушек краевой локализации и независимо закреплен на ребрах вакуумной камеры. Там, где нет катушек между коллектором и вакуумной камерой, устанавливаются заглушки на блок защиты, способствующие ядерной защите.

Модули blankets представлены двумя различными подсистемами, которые покрывают внутреннюю стенку камеры ИТЭР: настенные модули покрытия площадью 600 м^2 и навесные модули покрытия площадью 30 м^2 . Настенные модули blankets состоят из двух основных компонентов: панели первой стенки, обращенной к плазме и блока защиты, который поддерживает панель.

Каждый модуль blankets прикреплен к вакуумной камере с помощью механической системы крепления. Это крепление обеспечивает электрический контакт с камерой. Охлаждающая вода в модуль blankets подается по коллекторам, установленным на вакуумной камере позади или сбоку от блока защиты. Охлаждающая вода подается в блок защиты и из него через коаксиальный соединитель в патрубки. Патрубки обеспечивают достаточную гибкость, чтобы справиться с дифференциальным тепловым расширением вакуумной камеры и коллекторов во время плазменного разряда.

Панель первой стенки механически крепится на блок защиты с помощью шарнира (для реагирования на полоидальные и тороидальные моменты, радиальные силы), шпонок (для реагирования на радиальные моменты и полоидальные силы) и фиксирующих болтов (для реагирования на тороидальные моменты и радиальные силы). Охлаждающая вода в панель первой стенки подается из блока защиты по трубам диаметром 42 мм. Все элементы крепления первой стенки расположены в задней части центральной опорной балки первой стенки; отверстия для доступа со стороны плазмы предусмотрены в центральном пазу панели первой стенки, где тепловые нагрузки воспринимаются экранами первой стенки.

Модули blankets (рис. 5.1 и 5.2) разделены на 18 полоидальных сегментов, модули blankets с 1-го по 6-й находятся во внутренней области, модули blankets с 7-го по 10-й – в верхней области, а модули blankets с 11-го по 18-й – во внешней области.

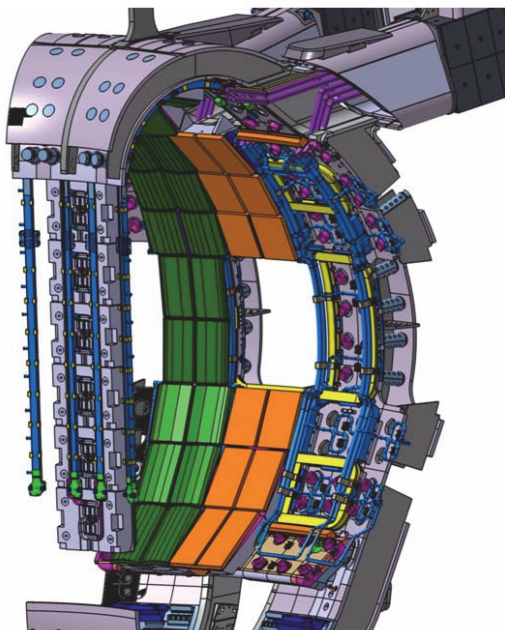


Рис. 5.1. Полоидальная сегментация с коллекторами и системой змеевиков внутри корпуса

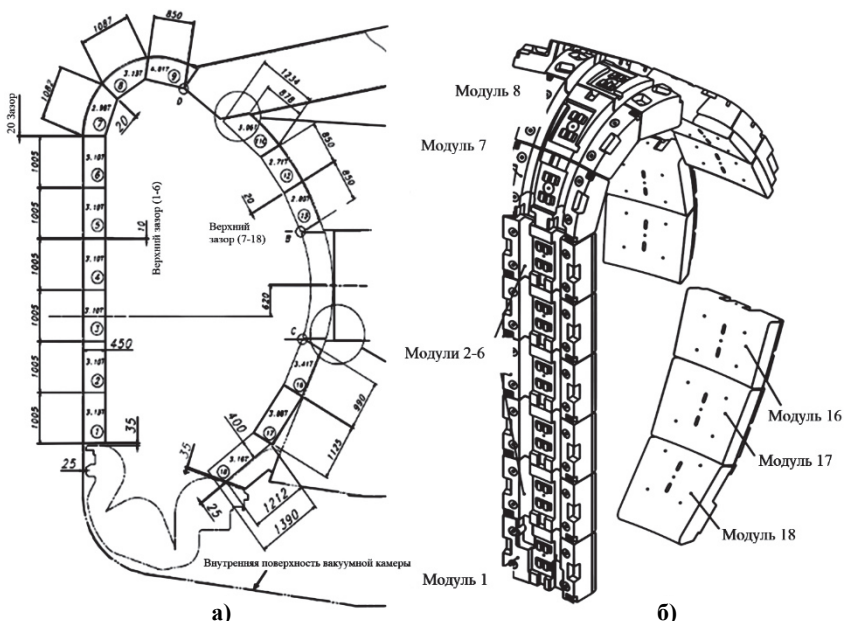


Рис. 5.2. Сегментация общего модуля (а); детали боковых зазоров и фасок первой стенки (б)

Внутренний и верхний модули (кроме МБ 10) разделены тороидально на 18 равных частей, а внешние модули (кроме МБ 14 и 15) разделены на 36 частей. В верхней и экваториальной области порта (МБ 10, 14 и 15) модули расположены между портами и разделены на 18 частей. В области порта ввода пучка нейтралов сектора 2, 3 и 4 камеры имеют сегментацию типичную для МБ 14 и 15. Во внешней области номинальные зазоры между модулями blankets составляют 20 мм как по горизонтали, так и по вертикали для установки и демонтажа. Чтобы увеличить ядерную защиту во внутренней области, вертикальные зазоры уменьшены до 14 мм, а горизонтальные – до 10 мм. Модули, устанавливаемые на порт, подбираются в зависимости от требований системы нагрева или диагностики, подключенной к разъему порта. В текущей конфигурации номинальная толщина модулей blankets составляет 450 мм для МБ 1–17. Толщина блока защиты БЗ 18, который поддерживается с помощью

треугольной опоры, составляет 400 мм. Соотношение сталь/вода/пустота было оптимизировано в отношении защиты от нейтронов. Сейчас оно составляет 86/10/4% и 85/12/3% для внутренних и наружных модулей blanketа соответственно. Для дальнейшего улучшения ядерной защиты катушек тороидального поля (ТП) рассматривается возможность увеличения толщины внутренних модулей blanketа. Это увеличение может касаться МБ 1, 2, 3, 5, 6, 7. Тогда обращенная к плазме поверхность этих модулей будет лучше повторять профиль плазмы, сохраняя при этом ту же форму плазмы и радиус плазмы. В настоящее время проводится оценка воздействия этих утолщенных модулей blanketа на электромагнитные нагрузки.

Общие параметры blanketа приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Общие параметры blanketа

Параметр		Значение
Количество модулей blanketа		440
Типичные размеры модуля		1,4×1,0×0,45 м
Максимальная масса модуля		4,5 т
Максимальная общая тепловая нагрузка		750 МВт
Материалы	Теплоотвод панелей первой стенки	Сплав CuCrSr-IG
	Покрытие	Вольфрам
	Блок защиты	SS316L(N)-IG
Общая масса (все модули)		1530 т

5.2. Настенные модули blanketа

Каждый модуль blanketа состоит из блока защиты и панели первой стенки (рис. 5.3). Панель первой стенки механически поддерживается блоком защиты с помощью шарнира (для реагирования на полоидальные моменты, тороидальные моменты и радиальные силы), шпонок (для реагирования на радиальные моменты и полоидальные силы) и фиксирующих болтов (для реагирования на тороидальные моменты и радиальные силы).

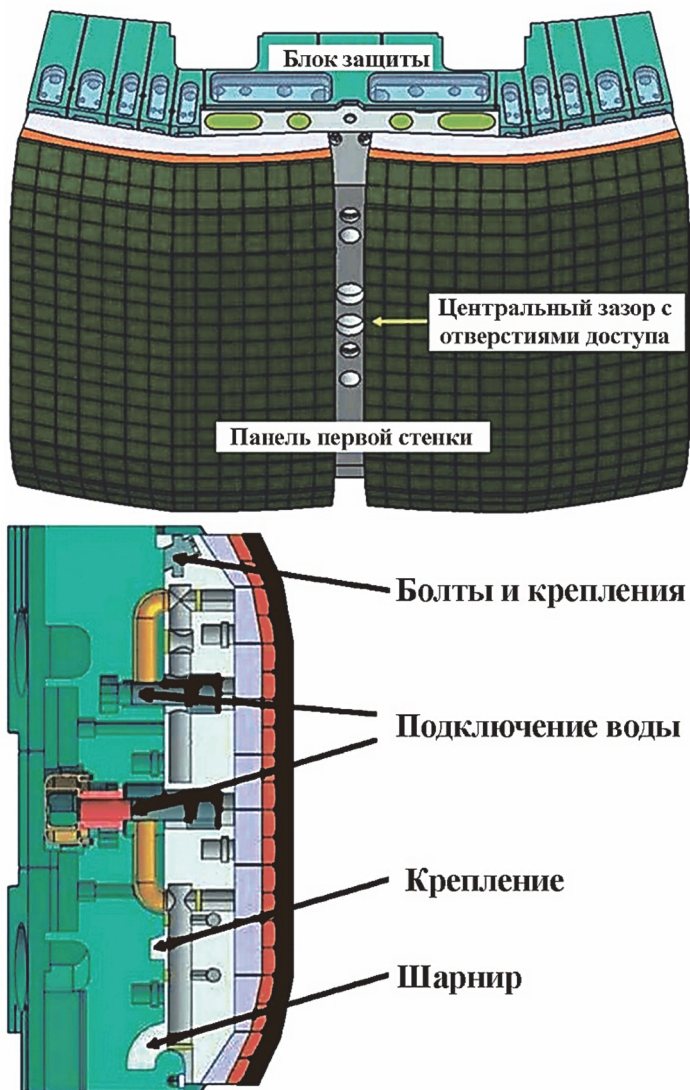


Рис. 5.3. Структура модуля blankets

Охлаждающая вода на панель первой стенки подается из блока защиты по трубам диаметром 42 мм. Все элементы крепления первой стенки расположены в задней части центральной опорной балки

панели первой стенки; отверстия для доступа со стороны плазмы предусмотрены в центральном пазу панели первой стенки, где тепловые нагрузки затеняются первой стенкой. Многослойные конструкции встроены в заднюю часть центральной опорной балки первой стенки, которая будет прижата к поверхности между панелью первой стенки и блоком защиты, образуя электрическое соединение между сборками.

5.3. Панель первой стенки

Панель первой стенки состоит из массива обращенных к плазме пальцев, которые собраны в центральную опорную балку из нержавеющей стали (рис. 5.4). Пальцы могут быть изготовлены и проверены отдельно, а затем установлены в опорную балку с помощью креплений типа «ласточкин хвост». Затем контуры охлаждения пальцев соединяются с контуром охлаждения центральной балки с помощью сварки.

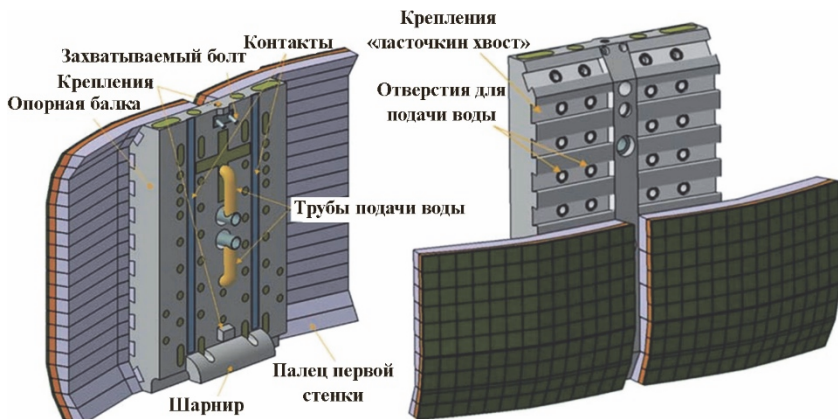


Рис. 5.4. Структура первой стенки

Пальцы, обращенные к плазме, рассчитаны как на «повышенный» (5 МВт/м^2), так и на «нормальный» (1 МВт/м^2) уровень теплового потока и используют одни и те же интерфейсы и функции крепления. На этапе проектирования принята следующая конструкция и материалы: каждый палец состоит из плиток покрытия из вольфрама (W), теплоотвода с водяным охлаждением из медного сплава

(CuCrZr) и опорной конструкции из нержавеющей стали (НС). Панель первой стенки выполнена в виде пальцев для уменьшения нагрузок, связанных с вихревыми токами. Пальцы собраны на центральной опорной балке в тороидальной ориентации, чтобы максимально выровнять распределение нагрузки от вихревых токов. Такая ориентация, однако, приводит к концентрации электрического гало-тока в нескольких пальцах, и пальцы должны реагировать на соответствующие нагрузки.

Два типа охлаждения (рис. 5.5) считаются необходимыми для уравнивания теплового потока:

- циркулирующая вода в стальной трубке для «нормального» теплового потока на первой стенке, в которой стальные трубки встроены в медный сплав (CuCrZr);
- циркулирующая вода в прямоугольных оребренных каналах типа «гипервапотрон» и круглых каналах из сплава CuCrZr для «повышенного» теплового потока на первой стенке.

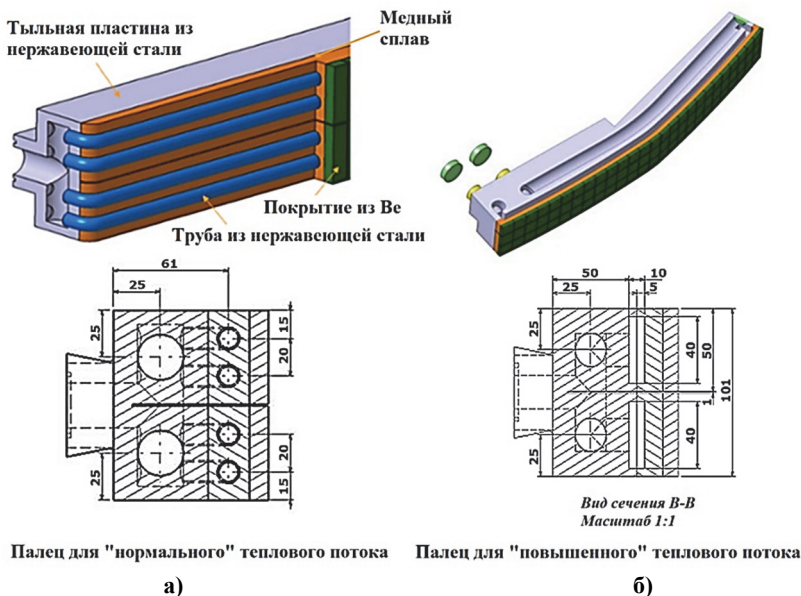


Рис. 5.5. Конструкция пальцев для «нормального» (а) и «повышенного» теплового потока (б)

Центральная опорная балка панели первой стенки изготовлена из нержавеющей стали. Она обеспечивает механическую поддержку пальцев с помощью соединений «ласточкин хвост» (рис. 5.6). Коллектор каналов водяного охлаждения соединен с пальцами через трубы с внутренним диаметром 24 мм.

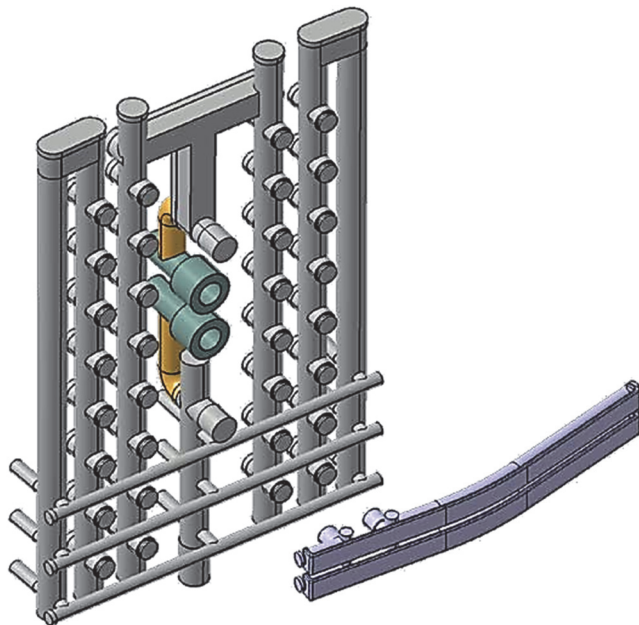


Рис. 5.6. Устройство охлаждения панели первой стенки и центральной опорной балки

Поверхность первой стенки каждой панели определяется тороидальной и полоидальной формой отдельных пальцев, собранных на двух боковых сторонах центральной опорной балки (рис. 5.7). Стороны разделены щелью шириной 60 мм, проходящей полоидально по центру панели. Углубление защищено от открытых линий потока плазмы эффектом затенения при формировании первой стенки. Панели имеют такую форму, что тепловые нагрузки на боковые стороны панелей снижаются до приемлемого уровня. Боковая тепловая нагрузка является результатом проникновения плазмы в зазоры и

отверстия. Несоосность между панелями является фактором, который потенциально может внести значительный вклад в боковую тепловую нагрузку. Все стороны панели подвержены боковой тепловой нагрузке, однако ключевыми проблемными областями являются:

- панели, расположенные сбоку от экваториальных портов.

Силовые линии проникают через тороидальный промежуток шириной 1,5 см между модулями и попадают на тороидальный край панели;

- верхние панели, где силовые линии почти тороидальны (близки к верхнему нулю) и могут проникать глубоко в зазоры, обращенные к тороидальной плоскости. Тепловой поток может достигать незащищенных поверхностей. Форма, приданная панели первой стенки, позволяет избежать чрезмерных температур на кромках.

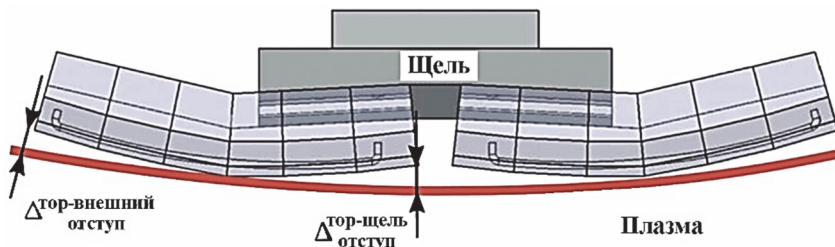


Рис. 5.7. Формообразование первой стенки:

горизонтальное поперечное сечение через внутреннюю панель

Каждая половина панели первой стенки имеет в сечении форму крыши с откосами, обращенными как в левые, так и в правые тороидальные направления. Наиболее заметной особенностью является выступ, идущий полоидально по каждой половине панели вблизи центра, который определяет точку контакта с плазмой. Поверхности магнитного потока соприкасаются с панелью в двух местах. Радиальные тороидальные отступ $\Delta_{\text{тор-внешний отступ}}$, $\Delta_{\text{тор-щель отступ}}$, с обеих сторон (щель и внешняя облицовка) изменяются в зависимости от индекса ряда. Величина отступов выбирается таким образом, чтобы обеспечить защиту краев как в центре панели, где расположен паз, так и по направлению к внешним краям панели. Отступы определяются в зависимости от максимально допустимого смещения шага

между модулями, тороидальной длины до следующего тороидального соседнего модуля и допускаемой тепловой нагрузки на кромку. Параметры формы устанавливаются в результате оптимизации для обеспечения минимального теплового потока. Для наружной стенки панель имеет полоидальную прямую форму.

Для модулей 14 и 15, которые находятся по бокам экваториальных портов на внешней стороне, форма спроектирована таким образом, чтобы панели могли выдерживать тепловую нагрузку в предположении, что в порту нет объекта. Это обоснование определяет общий подход, который определяет все возможные конфигурации портов. В этой конфигурации компоненты портов могут быть как углубленными, так и без формы.

При углублении порта, равном 40 мм, линии теплового потока не пересекают панели порта во время нормальной работы. Для компонентов порта, для которых требуется углубление менее 40 мм, таких как экран системы ионного циклотронного нагрева, может потребоваться некоторая обработка и, возможно, использование технологии с высоким тепловым потоком, чтобы разрешить значительные тепловые потоки.

На полоидальных колонках, содержащих "S"-образные панели (рис. 5.8), верхний и нижний модули (11, 12, 13; 16, 17, 18) формируются с использованием той же технологии, что и для 14 и 15, которые образуют подвесной полоидальный ограничитель. Вокруг корпуса 18 колонн "S"-модулей формируют 18 полоидальных ограничителей, которые защищают элементы порта и края панели от высоких тепловых нагрузок. Требуемая форма достигается путем выемки краев панелей, так что сохраняется существующий полоидальный контур стенки, и в результате не происходит потери объема плазмы.

Колонки "S" функционально независимы от остальной части подвесной стенки и являются самоподдерживающимися в отношении управления мощностью. Панели первой стенки над и под отверстиями ("C"-образные колонки) утоплены на 20÷40 мм (в зависимости от ряда). "C"-панели (рис. 5.8) остаются плоскими и не играют никакой роли в обращении с заряженными частицами. Тот же принцип используется и на внутренней панели, но с другими конструкционными

параметрами. Отсутствие отверстий на внутренней панели обеспечивает более гладкую стенку, а в радиальном обходе приходится учитывать только зазоры и наличие пазов.

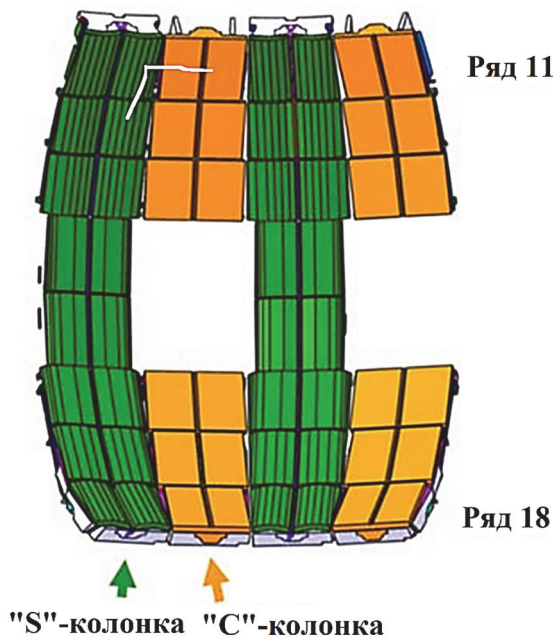


Рис. 5.8. Фигурные ("S"-образная колонка) и плоские ("C"-образная колонка) панели первой стенки

На внутренней стенке горизонтальные кромки не обеспечены защитой, создаваемой полоидальной кривизной плазмы – поток попадает в горизонтальные зазоры. Следствием этого является то, что требуется формообразование в полоидальном направлении, что делает поверхность внутренней панели «подушкообразной». Использование фигурных панелей для первой стенки обеспечивает повышенную способность выдерживать тепловые нагрузки. Тем не менее, тепловые потоки, ожидаемые во время переходных процессов с высокой энергией, могут повредить материал, обращенный к плазме (W-плитка).

На внутренних высоких боковых рядах с 1-го по 6-й панели полностью закрывают центральную колонну. Панели верхней секции с 7-й по 10-ю являются продолжением внутреннего покрытия. Панели в ряду 10 расположены между верхними отверстиями и образуют переход к подвесным полоидальным ограничителям.

В горизонтальном поперечном сечении панель первой стенки состоит из "S"-образных панелей альтернативной формы и плоских панелей

5.4. Защита от нейтронов

Основная функция блока защиты заключается в обеспечении ядерной защиты и снабжении панели первой стенки водой для охлаждения. Чтобы максимизировать эффективность ядерной защиты, требуется оптимальное соотношение нержавеющей стали и воды. Это соотношение достигается за счет оптимизации количества полоидальных охлаждающих каналов и их размера внутри блока защиты. В блоке защиты проделан ряд глубоких прорезей, чтобы уменьшить влияние электромагнитных нагрузок на конструктивные нагрузки опорной системы и вакуумной камеры.

Обращенная к плазме поверхность блока защиты подвержена гораздо более высокому воздействию и нагрузкам, чем тыльная сторона, что требует правильного распределения охлаждающей жидкости в блоке. В тыльной части просверлены отверстия большего размера, как для распределения воды, так и для охлаждения задней части. Коллекторы для воды смонтированы на боковой стороне модуля с помощью приваренных накладок толщиной 10 миллиметров. Принимая во внимание низкое тепловыделение в тыльной стороне и импульсный режим работы ИТЭР, каналы охлаждения расположены над вырезами в блоке защиты. Такое расположение упрощает как водяной контур, так и процедуру изготовления с максимальной локальной температурой 250°C. Способ изготовления блока защиты основан на использовании одно- или многослойных кованых стальных блоков и включает сверление отверстий, сварку накладок водяных коллекторов и окончательную обработку поверхностей сопряжения (рис. 5.9).

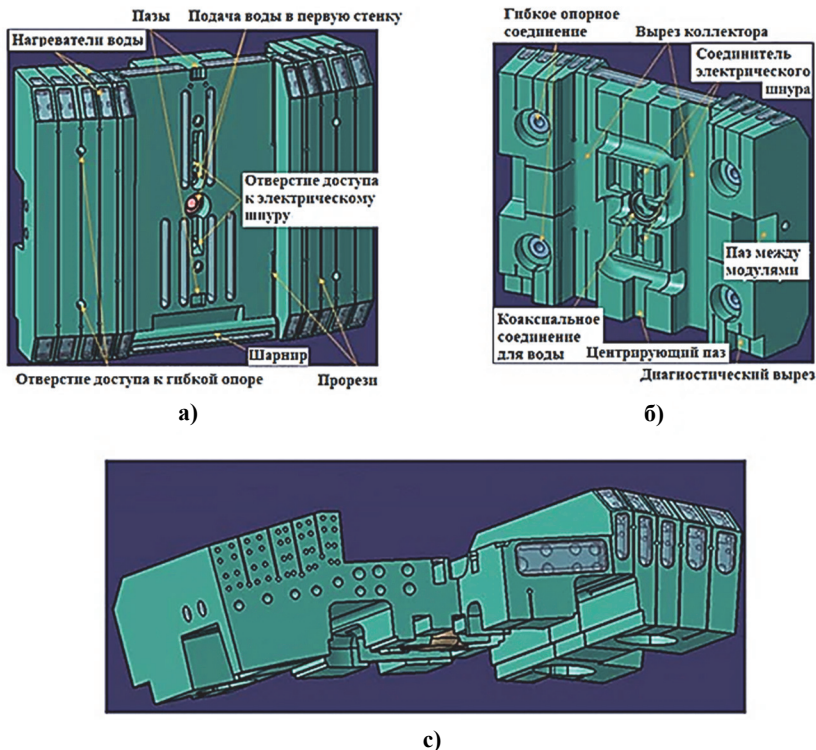


Рис. 5.9. Структура блока защиты:
вид спереди (а); вид сзади (б); полоидальные отверстия охлаждения (с)

5.5. Соединения бланкета

Механическое крепление состоит из четырех гибких опор и системы ключей (фиксирующих вставок). Электроизоляционные покрытия наносятся на механические крепления, чтобы предотвратить протекание электрического тока через опоры и контролировать электромагнитные нагрузки на бланкет. Гибкие опоры расположены в задней части блока защиты, где нейтронные потоки ниже. Схемы реакции опоры крепления бланкета проиллюстрированы на рис. 5.10.

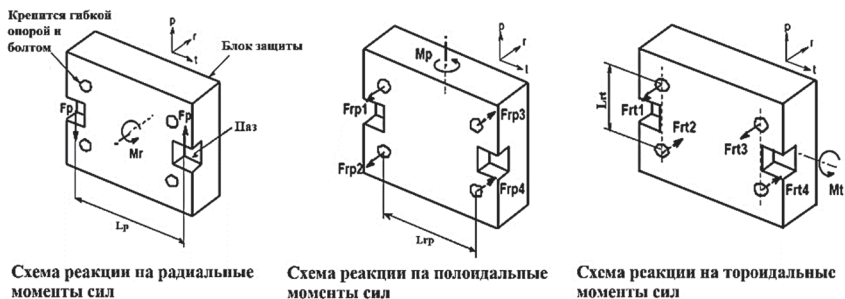


Рис. 5.10. Схемы реакции опоры креплений внутреннего бланкета:

r – вектор радиального направления; p – вектор полоидального направления;

t – вектор тороидального направления;

Fr – полоидальная составляющая силы для радиального момента;

Frp – радиальная составляющая силы для полоидального момента;

Frt – радиальная составляющая силы для тороидального момента;

Lp – плечо пары сил Fr ; Lrp – плечо пары сил Frp ;

Lrt – плечо пары сил Frt ; Mr – радиальный момент силы;

Mp – полоидальный момент силы; Mt – тороидальный момент силы

Гибкие опоры (рис. 5.11) реагируют на радиальные электромагнитные нагрузки от модуля бланкета, оставаясь подвижными в двух других осях. Это обеспечивается трубчатым картриджем с осевыми прорезями в стенке. Во внутренней области гибкая опора M150 используется для восприятия расчетного радиального усилия $500 \div 600$ кН, в то время как гибкая опора M130 используется во внешней области для восприятия расчетного радиального усилия $300 \div 480$ кН. Обе опоры допускают боковое смещение ± 1 мм и фланцевое вращение ± 3 мрад. Гибкие опоры также используются для компенсации положения блока защиты на стенке вакуумной камеры с помощью специальной обработки. В конструкцию опор встроена регулировка до ± 10 мм в осевом направлении и ± 5 мм в поперечном направлении для индивидуального процесса обработки. После настройки контактная поверхность гибкой опоры, которая взаимодействует с модулем защиты, будет покрыта Al_2O_3 для обеспечения электрической изоляции.

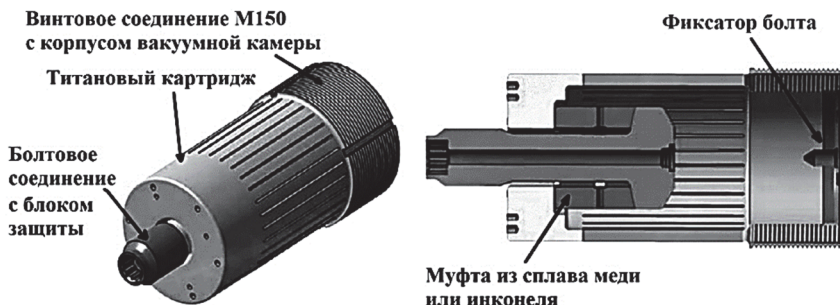


Рис. 5.11. Гибкая опора

Каждый встроенный модуль имеет два межмодульных ключа, рассчитанных на выдерживание расчетного усилия 1350 кН (включая динамический коэффициент усиления). Межмодульные ключи (рис. 5.12а) реагируют на радиальный крутящий момент и пологоидальные усилия, в то время как центрирующий ключ реагирует на меньшие тороидальные усилия.

Межмодульные ключи оснащены бронзовыми накладками с покрытием с низким коэффициентом трения, обеспечивающими скольжение интерфейсов модулей при относительном тепловом расширении. Трение поверхностей скольжения накладок ключей уменьшается за счет покрытия открытых бронзовых поверхностей накладки дисульфидом молибдена MoS_2 . Электрическая изоляция накладок обеспечивается нанесением изолирующего керамического покрытия на внутренние поверхности накладки. Накладки, в свою очередь, крепятся к ключам с помощью изолированного болтового соединения. В области внешнего блока ключи выполнены в виде заглушек, концентричных гибким опорам (рис. 5.12б). Эти заглушки рассчитаны на то, чтобы выдерживать расчетное усилие 900 кН (включая динамический коэффициент усиления). Электрическая изоляция и покрытия с низким коэффициентом трения также используются в компоновке, аналогичной компоновке внутренней области. Накладки для ключей обработаны с учетом производственных допусков вакуумной камеры и блока защиты (рис. 5.13).



Рис. 5.12. Межмодульный ключ (а) и ключ-заглушка (б)

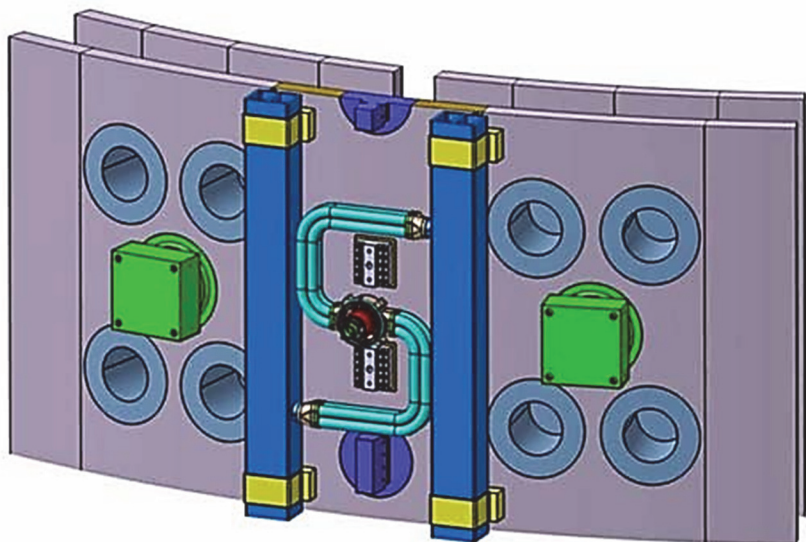


Рис. 5.13. Крепление встроенного модуля с межмодульными и центрирующими ключами

5.6. Бланкет смонтированный на портах

К навесным бланкетам (рис. 5.14) предъявляются те же требования, что и к настенным бланкетам. На верхнем порту крышка, установленная на порту, настроена таким образом, чтобы соответствовать 12 штекерам диагностических портов (на портах 1–3, 5,

7–11, 14, 17 и 18). Шесть модулей blankets, устанавливаемых на экваториальных портах, настроены таким образом, чтобы соответствовать шести разъемам диагностических портов (на портах 1, 3, 9–12). Все модули blankets, устанавливаемые на диагностический порт, поддерживаются структурами разъемов портов. Каждый модуль blankets, установленный на верхнем диагностическом порту, разделен на две части, а экваториальные портовые модули blankets разделены на четыре части. Разделение защиты blankets упрощает процесс монтажа и снижает электромагнитные нагрузки.

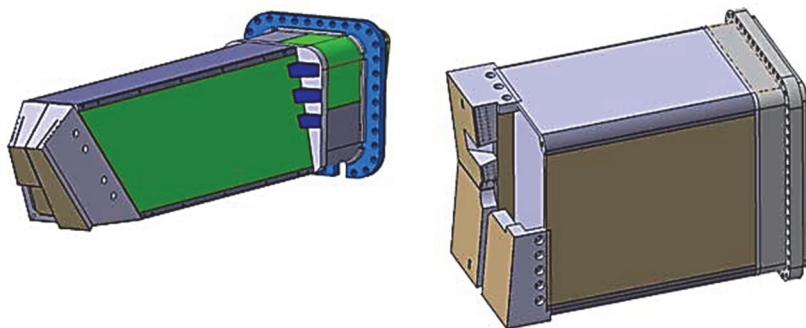


Рис. 5.14. Верхний и экваториальный диагностический порт, установленный на модуле blankets

Внедрение системы внутрикамерных катушек (рис. 5.15) снаружи и связанные с этим многообразные адаптации привели к некоторым изменениям в защите blankets. Все катушки в камере укладываются тороидально и полоидально в зазоре между модулями blankets. Таким образом, они не пересекают центр модуля blankets, за исключением верхних катушек вертикальной стабилизации, которые являются местом, предназначенным для гидравлического соединения и электрических ремней. Однако в корпусах катушек и патрубков коллектора были выполнены дополнительные вырезы (рис. 5.15). Заглушки ключей перемещаются с учетом этой модификации.

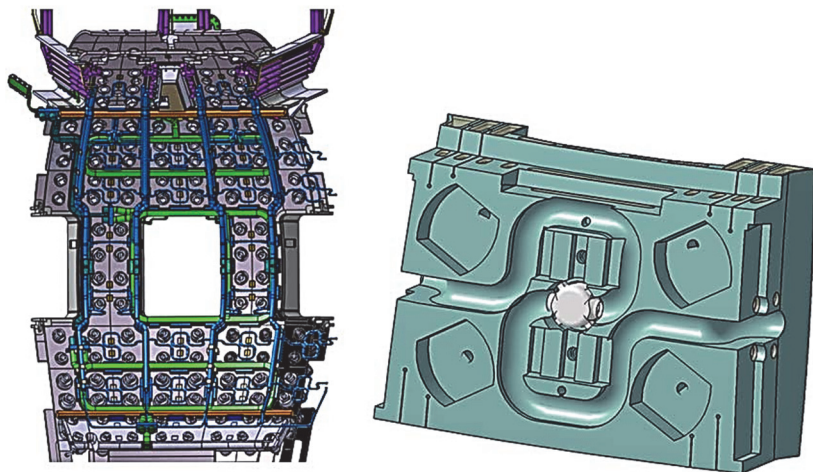


Рис. 5.15. Иллюстрация вырезов во внутрикорпусных катушках и блоке защиты blankets

5.7. Топология обращенных к плазме компонентов и расчетные тепловые нагрузки

Первая стенка должна выдерживать тепловую нагрузку плазмы во время работы. Распределение тепловой нагрузки не позволяет эффективно использовать всю поверхность первой стенки: некоторые области затенены для некоторых магнитных конфигураций, но могут быть открыты для других конфигураций. Рассмотрим наиболее значимые примеры дизайна.

1. Режим «Запуск и окончание разряда»: плазма ограничена стенкой до и после фазы отклонения от сценария. Возможны как внутренние, так и внешние контакты. В принятых расчетах принималось, что мощность, поступающая на обдирочный слой, равна 7,5 МВт, что составляет часть мощности горячей плазмы, но сепаратриса (последняя замкнутая поверхность потока) контактирует со стенкой. Параллельные силовые линии переносят до 50 МВт/м^2 . Внутренний контакт сосредоточен в рядах 3 и 4, внешний контакт – в рядах 14–17.

2. Стационарная стадия разряда: фаза горения длится 400 секунд. Большая часть энергии, проходящей через обдирочный слой, поступает в отводящие элементы. Первая поверхность потока, достигающая стенки, находится на расстоянии 40 мм от сепаратрисы. Она может передавать до 33 МВт/м^2 вдоль силовых линий из-за краевых локализаций, которые усиливают мощность обдирочного слоя.

Этот тепловой поток достигает верхних панелей с 7-й по 10-ю. Существуют локализованные тепловые нагрузки, связанные с дополнительными системами нагрева (тепловые потоки оболочки для системы ионного циклотронного нагрева, просвечивание для пучка нейтралов нагрева).

Все эти тепловые нагрузки могут локально достигать значения до 4 МВт/м^2 , причем эта цифра считается «нормальной» для поверхности первой стенки для плотности выделившегося теплового потока, который проходит через конструкцию в стационарном состоянии. Есть и другие нагрузки, которые связаны с переходными явлениями (убегающие электроны, вертикальное смещение, Н–L-переходы).

Моделирование показывает, что тепловая нагрузка на стенку слишком велика. Мониторинг этих нагрузок и их смягчение является частью комплексного плана исследований ИТЭР. Тепловой поток, выделившийся на панелях, распределяется неравномерно. В соответствии с описанными выше конструктивными примерами наибольший тепловой поток приходится на ряды 3, 4, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 17. Ряды 1, 2, 5, 6, 11, 12, 13, 18 получают меньший тепловой поток. Сочетание формообразования с возможными вариантами проектирования приводит к тепловой нагрузке $4\div 5 \text{ МВт/м}^2$ для наиболее нагруженных панелей и 1 МВт/м^2 для наименее нагруженных. Распределение между панелями мощностью от 1 до 5 МВт/м^2 приведено на рис. 5.16.

Периодическое распределение панелей изменяется вокруг портов инъекции нейтралов. «Улучшенные панели теплового потока» используются для защиты боковых сторон отверстий инжектора нейтралов.



Рис. 5.16. Распределение «нормальных» (светло-серых) и «улучшенных» (темно-серых) панелей первой стенки

5.8. Сборка и техническое обслуживание blankets

Блок защиты устанавливается «внутрикамерным транспортером» в шахте после метрологического обследования интерфейсов вакуумной камеры и настройки накладок ключей, гибкой опоры и гидравлических соединений. Панель первой стенки устанавливается после установки блока защиты, поскольку доступ к гибким опорным креплениям невозможен через панель первой стенки. Чтобы установить панель первой стенки, внутренняя вертикальная мишень требует выполнения ряда заранее определенных перемещений, чтобы обеспечить правильное расположение поворотного шарнира. Для установки шарнира в правильную точку поворота требуется перемещение, за которым следует поворот примерно на 10° для подключения интерфейсов панели первой стенки и блока защиты. Для того чтобы можно было снять панель первой стенки, последовательность действий должна быть обратной (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Упрощенный процесс установки и снятия панели первой стенки

Модуль бланкета диагностических портов и порта электронного циклотронного нагрева собирается на штекерах портов перед установкой всего узла штекеров в машину.

5.9. Техническое обслуживание бланкета

Модули бланкета спроектированы таким образом, чтобы выдерживать 20 лет эксплуатации ИТЭР с точки зрения усталости и эрозии. Однако, что касается панелей первой стенки, возможные нагрузки, связанные с переходными процессами (убегающие электроны, вертикальное смещение, Н–L-переходы), могут привести к более высокой вероятности отказа, чем один раз в 20 лет (на основе анализа надежности, доступности, ремонтпригодности и возможности проверки). Как следствие, существует требование разрешить замену и ремонт панелей первой стенки из-за эксплуатационных повреждений, эрозии или необходимости заменить материал первой стенки. Поэтому панели первой стенки должны быть компонентами класса удаленного управления RH 1.

Ожидается, что блоки защиты не потребуют замены, поскольку панели первой стенки защищают их от прямого взаимодействия с плазмой. Таким образом, капитальный ремонт или модернизация не предвидятся. Однако, внутрикамерные катушки, которые расположены за блоком защиты, относятся к классу удаленного управления RH 3, и, как следствие, блоки защиты должны иметь тот же класс удаленного управления RH. Это также позволило бы их возможную замену в случае непредвиденных повреждений, включая утечки, и замены бланкета защиты на бланкет воспроизводства топлива, как определено в эксплуатационном плане.

Первичные контуры охлаждения, питающие систему охлаждения, освобождаются от теплоносителя и высушиваются перед удалением любых компонентов системы охлаждения. Осушение общих коллекторов достигается с помощью специальных дренажных труб, включенных в систему. Остаточный теплоноситель будет испарен с помощью других вспомогательных систем. Техническое обслуживание любых заглушек на диагностических портах и портах электронного циклотронного нагрева будет проводиться в специальной камере после полного удаления системы заглушек портов из машины.

Основные параметры blankets представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Основные параметры blankets

Параметр	Значение
Количество модулей blankets	440
Максимальная тороидальная длина	1,99 м
Максимальная полоидальная длина	1,24 м
Типичный размер модуля	1,4 × 1,0 × 0,45 м
Максимальная допустимая масса одного модуля	4,5 т
Общая масса модулей blankets	1530 т
Максимальный радиальный шаг между соседними панелями первой стенки	5 мм
Максимальное радиальное смещение от исходного положения	±10 мм
Тип охлаждающей жидкости:	Вода
Количество петель	3
Температура на входе (°C)	100
Входное давление на заглушках труб (МПа)	3,0
Максимальный допустимый перепад давления (МПа) во внутренней части системы общего охлаждения	1,5
Расход в контуре (кг/с)	1130
Минимальная скорость потока в панели первой стенки	1,5
Минимальная скорость потока в блоке защиты (м/с)	0,8
Расчетное давление (МПа)	5,0
Материалы	
Теплоотвод из панелей первой стенки	Сплав CuCrZr-IG
Покрытие	W (S-65C или эквивалент)
Трубы и гидравлические соединения	316L
Блок защиты	316L(N)-IG

Окончание табл. 5.2

Параметр	Значение
Гибкая опора: – картридж;	Ti-6Al-4V (с изоляционным покрытием)
– болт;	Inconel 718 (с резьбой с изоляционным покрытием)
– прижимной хомут	C63200 Ni-Al бронза
Ключи	C63200 Ni-Al бронза с изоляционным покрытием и смазочным покрытием из MoS ₂
Винты накладок в виде ключа	Inconel 625 (с резьбой с изоляционным покрытием)
Электрическое соединение	
Гнутые листы	Сплав CuCrZr-IG
Гнездо торцевого и центрального блоков	316L(N)-IG
Винт блока защиты	Inconel 625 (с резьбой с изоляционным покрытием)
Болт	Inconel 718 с резьбой с изоляционным покрытием
Шпильки на вакуумной камере	316L
Расчетный тепловой поток на панелях первой стенки	1 и 5 МВт/м ² в зависимости от местоположения
Максимальное нейтронное повреждение в W/ радиаторе / стальной трубе	1,6/5,3/ 3,4 сна
Максимальное нейтронное повреждение в блоке защиты	2,3 сна
Максимальная общая тепловая нагрузка	750 МВт
Максимальная допустимая скорость утечки	$< 10^{-8}$ Па·м ³ ·с ⁻¹
Запас до кризиса теплообмена	1,4
Площадь обращенной к плазме поверхности	~ 630 м ²
Важность класса безопасности	Не относится к SiC
Класс качества	1
Классификация вакуума: панель первой стенки и блока защиты гибкие кабели, накладки в виде ключей, электрические разъемы	VQC-1A VQC-1B
Сейсмический класс	SC2

5.10. Общая конфигурация дивертора

Дивертор ИТЭР состоит из 54 кассетных сборок, которые вставляются радиально через три порта нижнего уровня и перемещаются тороидально перед фиксацией в нужном положении. Каждая кассетная сборка включает в себя один корпус кассеты (КК) и три компонента, обращенные к плазме (КОП), а именно внутренняя и внешняя вертикальные пластины, и купол (рис. 5.18). Внутренняя и внешняя вертикальные пластины представляют собой обращенные к плазме компоненты, которые в своих нижних частях непосредственно взаимодействуют с СОЛ (область плазмы с открытыми линиями поля, начинающимися или заканчивающимися на поверхности материала). В своих верхних частях они действуют как отражатели для нейтралов.

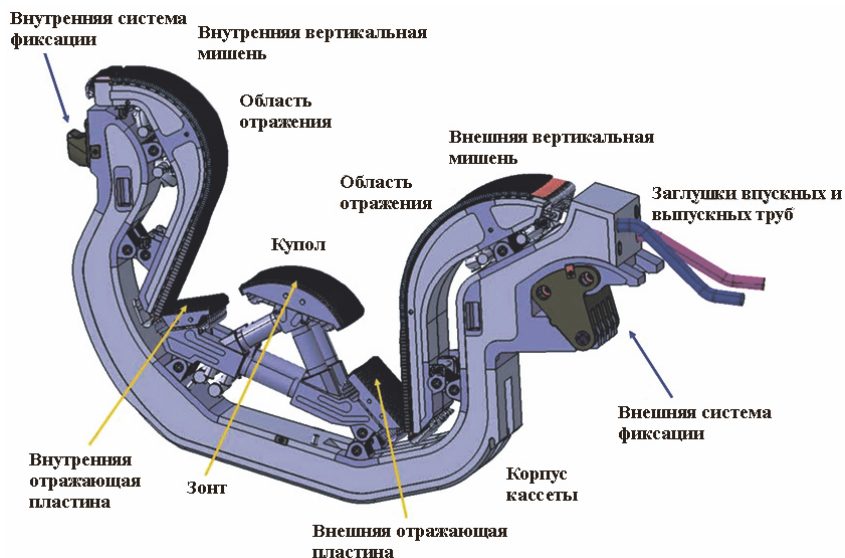


Рис. 5.18. Сборка кассеты дивертора

Купол, расположенный в области под сепаратрисой, из которой нет проникновения потока силовых линий вектора магнитной индукции в область основной плазмы, состоит из:

– зонта, расположенного ниже X-точки сепаратрисы, на который воздействуют в основном излучение и нейтралы перезарядки. Он дополнительно задерживает нейтральные частицы и защищает корпус кассеты;

– внутренней и внешней пластины отражателя нейтральных частиц, которые вместе с нижними концами вертикальных мишеней образуют форму буквы “V”. Это удерживает частицы в каналах дивертора с целью уменьшения экстремального теплового потока.

Корпус кассеты можно использовать повторно, чтобы свести к минимуму количество активированных отходов. Корпус кассеты обеспечивает защиту от нейтронов и механическую опору для различных возможных компоновок, обращенных к плазме компонент.

Внутренние и внешние системы фиксации соединены с корпусом кассеты для обеспечения крепления и выравнивания кассет дивертора относительно вакуумной камеры через жесткие накладки на внутренних и внешних направляющих дивертора.

Заглушки впускных и выпускных охлаждающих труб расположены во внешней части корпуса кассет, которые соединяются с радиальными трубами охлаждения. Радиальные трубы охлаждения соединены с тремя кассетами в каждом 20-градусном секторе вакуумной камеры.

Обращенные к плазме компоненты должны располагаться под углом, чтобы избежать воздействия СОЛ плазмы на передние кромки покрытия. В противном случае почти перпендикулярное попадание плазмы на эти кромки приведет к испарению или расплавлению большого количества вольфрама с присущим риском попадания вольфрама в плазму и/или возникновению критического теплового потока в водяном теплоносителе в обращенных к плазме компонентах. Допуски при изготовлении и монтаже должны быть сведены к минимуму, поскольку чем больше допуск, тем больший угол требуется для защиты передних кромок пластин, и чем больше угол, тем выше тепловой поток на пластины.

Конструкция дивертора допускает максимальное смещение между обращенными к плазме компонентами на соседних кассетах не более $\pm 1,5$ мм.

Исходная направленность тороидального тока плазмы и тороидального магнитного поля должна быть следующей: ток плазмы направлен в отрицательном направлении (по часовой стрелке, если смотреть сверху) при отрицательном направлении (по часовой стрелке) тороидального поля. Это дает направление вниз (к X-точке дивертора) градиента вектора магнитной индукции от дрейфа ионов. Исходная направленность тороидального тока плазмы и магнитного поля определяет ориентацию наклона обращенных к плазме компонент (рис. 5.19).

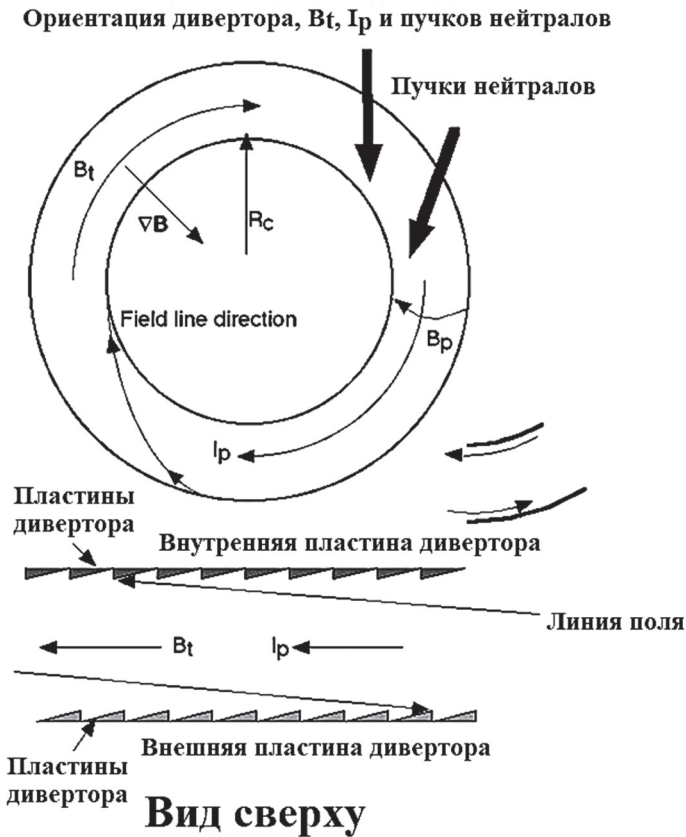


Рис. 5.19. Ориентация наклона

Каждая обращенная к плазме компонента механически закреплена на корпусе кассеты с помощью двух многозвенных насадок. Одно многорычажное крепление обеспечивает как вращение вокруг тороидальной оси, так и полоидальное перемещение. Другое многорычажное крепление допускает только вращение (рис. 5.20). Толщина выступов многорычажных насадок составляет 14 мм, что достигается точной механической обработкой кованных деталей, изготовленных из аустенитной стали ХМ-19. Размеры опор рассчитаны на электромагнитные нагрузки при переходных процессах в плазме (срывах и др.).

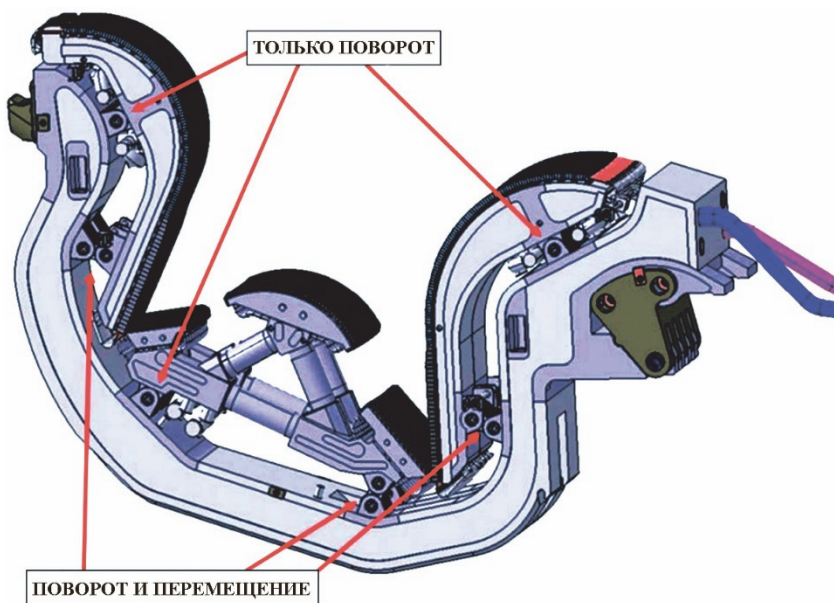


Рис. 5.20. Многозвенные вложения компоненты, обращенной к плазме

Геометрия дивертора основана на моделировании, полученном с использованием кода B2-EIRENE (SOLPS) и результатов экспериментов на токамаках. Образцовой конфигурацией для дивертора ИТЭР является вертикальная мишень с открытой отдельной областью потока и куполом ниже X-точки. Вертикальные пластины наклонены таким образом, чтобы пересекать силовые линии сепаратрисы под острым углом.

Для уменьшения нагрузок на пластины дивертора предлагается работать в режиме отрыва плазмы от поверхности (режим «детач»). В этом режиме, в области вблизи сепаратрисы формируется переизлучение мощности и расширение потока частиц на более широкие поверхности пластин дивертора, уменьшая локальную плотность тепловой нагрузки на материал пластин дивертора.

Работа в режиме «детач» также облегчает откачку газов из диверторного объема, поскольку давление нейтралов и парциальное давление гелия в области отдельного потока будут значительно увеличены (от 0,3 до 10 Па). Это обеспечивает достаточно быструю откачку гелия, чтобы поддерживать концентрацию гелия в основной плазме ниже 6%. Зонт купола предназначен для обеспечения снижения парциального давления нейтральных частиц между дивертором и основной камерой.

Этот поток газа движется под зонтом, откуда он течет радиально наружу под внешними вертикальными пластинами, затем через щель откачки в корпусе кассеты, а оттуда к крионасосам. Щель в корпусе кассеты находится за внешней вертикальной пластиной, где поток нейтронов невелик. Для поддержания достаточно высокого давления газа предусмотрено большое отверстие в области купола под зонтом. Это обеспечивает свободную рециркуляцию нейтралов из внутренней области во внешнюю область потока и их повторную ионизацию в плазме дивертора (более высокие давления во внутреннем потоке наблюдаются в экспериментах и предсказываются моделированием).

Чтобы поддерживать экстремальный тепловой поток на вертикальных мишенях на уровне 20 МВт/м^2 , необходимо чтобы нижняя поверхность корпуса кассеты точно повторяла внутренний профиль камеры, особенно в областях непосредственно под вертикальными мишенями. Однако зазор между нижней поверхностью корпуса кассеты и вакуумной камерой должен сохраняться с учетом допусков на сборку, малого перемещения камеры и дивертора при тепловых и электромагнитных нагрузках, а также для того чтобы оставить место для прокладки диагностических кабелей и для направляющих трубок для пеллет-инъекции.

Расчетные тепловые нагрузки дивертора

Расчетный тепловой поток на нижний сегмент вертикальной пластины составляет $5 \div 10$ МВт/м² при нормальной эксплуатации. Однако также должна быть предусмотрена возможность отвода до 20 МВт/м² в среднем за несколько десятков секунд, в том числе, во время ЭЛМов. Верхний сегмент вертикальной пластины предназначен для отвода тепловых потоков до 5 МВт/м² в стационарном режиме, что обеспечивает гибкость конфигурации и широкие профили выделения мощности в L-режиме, а также высокие плотности излучения плазмы вблизи X-точки в условиях режима «детач».

Эффективность выбранных производственных технологий была экспериментально продемонстрирована в ходе успешного изготовления и тестирования «квалификационных прототипов» QPs среднего размера. Прототипы имели длину 400 мм и состояли из трех блоков, установленных на охлаждаемой несущей конструкции. Испытания выполнены при тепловом воздействии при параметрах, ожидаемых в ИТЭР.

Обращенные к плазме компоненты облицованы покрытием. Покрытие изготовлено из вольфрама. Посредством медной прослойки оно крепится к активно охлаждаемой подложке – теплоотводу, изготовленному из сплава на основе меди CuCrZr.

Вертикальная пластина дивертора

Каждая кассета содержит одну внутреннюю и одну внешнюю вертикальную пластину. Чтобы уменьшить электромагнитные нагрузки, каждая вертикальная пластина разделена на два одинаковых и независимых компонента. Каждый компонент состоит из стальной несущей конструкции, на которой установлены блоки, обращенные к плазме (БОП). Обращенный к плазме блок представляет собой одиночный полоидальный элемент. Каждая внешняя вертикальная мишень имеет двадцать два блока, обращенных к плазме (по одиннадцать на компонент), и две стальные опорные конструкции (по одной на компонент). Каждая внутренняя вертикальная пластина имеет шестнадцать блоков, обращенных к плазме (по восемь на компонент), и две стальные опорные конструкции (по одной на компонент). На рисунке 5.21 показан трехмерный вид внешней вертикальной пластины.

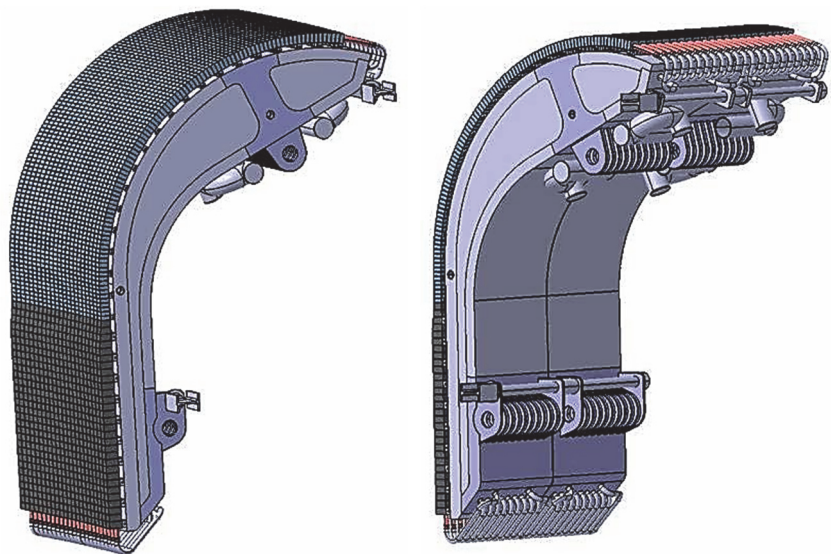


Рис. 5.21. Трехмерный вид внешних вертикальных мишеней, состоящих из двух одинаковых компонент

Блоки, обращенные к плазме, имеют плоскую плиточную облицовку из вольфрама, которая соединена с биметаллической подложкой из стали CuCrZr/316L (N)-IG с гипервапорным охлаждением. Чтобы уменьшить напряжение на стыке, между W-покрытием и стороной CuCrZr подложки предусмотрена прослойка из чистой меди (толщиной около 2,0 мм). Каждая плитка из W имеет толщину 8 мм. Блоки, обращенные к плазме, разделены зазором 0,5 мм и установлены на охлаждаемую опорную конструкцию. На полоидальной средней плоскости купола полоидальные блоки разделены зазором в 1 мм между стальными деталями и зазором в 4 мм между W-плитками для уменьшения риска образования мостиков из расплавленного вольфрама. Блоки, обращенные к плазме, монтируются на несущую конструкцию через пазы, которые получаются путем механической обработки стального блока. Блок входит в зацепление с соответствующими накладками в несущей конструкции. Пазы и накладки затем механически крепятся с помощью двух длинных

штифтов из никелевой бронзы (диаметром 18 мм), которые вставляются в два крепежных отверстия. Внутреннее и внешнее многозвенные крепления купола изготовлены из кованных деталей из аустенитной стали ХМ-19. Верхние части этих кованных деталей обрабатывают до их окончательной формы, чтобы получить опорную конструкцию для блока, обращенного к плазме, а также для внутренних коллекторов для водяного теплоносителя. Боковые крышки коллекторов толщиной 10 мм привариваются после механической обработки коллекторов. Шесть соединительных труб между внутренними, внешними и верхними опорными конструкциями блока, обращенного к плазме, изготовлены из стали 316L.

Корпус кассеты дивертора

Корпус кассеты, поддерживающий обращенные к плазме компоненты, сконструирован таким образом, чтобы выдерживать электромагнитные нагрузки, обеспечивать экранирование для вакуумной камеры и катушек. Он включает внутренние каналы циркуляции жидкости, охлаждающей корпус кассеты. Каналы действуют как коллекторы распределения жидкости в обращенные к плазме компоненты. Конструкция всех корпусов кассеты идентична и не зависит от расположения в токамаке. Единственным исключением является конструкция корпуса, в котором размещена нижняя вертикальная нейтронная камера. Корпус кассеты – это сварной элемент, изготовленный из пластин из кованой аустенитной нержавеющей стали ХМ-19 и 316L(N)-IG. Размер корпуса кассеты составляет 3,3 м в длину, ~ 2,0 м в высоту и 0,4±0,8 м в ширину, а масса 5,15 тонны (масса всего дивертора в сборе, а именно корпус кассеты вместе с обращенными к плазме компонентами, составляет 8,6 тонны). Минимальная толщина корпуса кассеты в радиальном сечении составляет 240 мм, что позволяет максимально увеличить глубину канала дивертора. Толщина 240 мм включает в себя стальную переднюю панель толщиной 40 мм, стальную заднюю панель толщиной 60 мм и 140 мм воды. Передняя и задняя пластины приварены к боковым и внутренним пластинам (обе толщиной 40 мм).

Охлаждение дивертора

Расчетный расход деминерализованной воды через систему охлаждения дивертора составляет 934 кг/с. Температура и давление на входе должны составлять 100°C и 4,2 МПа соответственно. По оценкам, максимальное падение давления в камере составляет менее 1,6 МПа. Поддерживается достаточный запас по отношению к критическому тепловому потоку CHF (запас CHF > 1,4) для каждой компоненты. Корпус кассеты соединен с контуром охлаждения дивертора посредством пары труб с внутренним и внешним диаметром 66,9 и 73,0 мм соответственно. Охлаждающая жидкость направляется сначала во внешнюю вертикальную пластину, затем во внутреннюю вертикальную пластину и, наконец, в купол. Во внутренней вертикальной пластине скорость охлаждающей жидкости более высокая, чтобы достичь такого же запаса по критическому тепловому потоку CHF, как и во внешней вертикальной пластине. Температура охлаждающей жидкости на выходе повышается примерно на 53°C после охлаждения дивертора при работе токамака на полной мощности плазмы.

Общие параметры дивертора приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Общие параметры дивертора

Параметр		Значение
Количество кассет		54
Типичные размеры кассеты (длина×высота×внутренняя/наружная ширина)		3,3×2,3×0,4 / 0,8 м
Корпус кассеты/внутренняя мишень/купол/масса внешней пластины		5,2 /0,9 /1,3 /1,4 т
Максимальная общая тепловая нагрузка		210 МВт
Материалы	Теплоотвод обращенных к плазме блоков	Сплав CuCrSr-IG
	Покрытие	W
	Корпус кассеты	SS 316 L(N)-IG, XM-19
Общая масса (все кассеты)		470 т

5.11. Установка кассеты дивертора в вакуумную камеру

Кассеты дивертора расположены в нижней части вакуумной камеры. Кассета дивертора обращена к модулю бланкета №1 (внутренний) и №18 (внешний) с номинальными зазорами 28 мм и 85 мм соответственно.

Дивертор разделен на 54 кассеты. Каждая кассета дивертора занимает сектор $6,67^\circ$ в тороидальном направлении (включая один зазор на модуль). Это обосновано максимальным размером кассеты, которая может быть введена через порты удаленного управления. Из девяти нижних портов три порта, расположенных на равном расстоянии друг от друга, предназначены для удаленного обслуживания дивертора. Эти порты имеют высоту 2175 мм и ширину 1385 мм (ширина в нижней части трапецевидного поперечного сечения отверстия – 723 мм), что достаточно для установки кассет.

Кассета дивертора крепится к двум концентрическим внутренним и внешним тороидальным направляющим, приваренным к вакуумной камере с помощью жестких накладок. Нижние порты включают в себя опорные площадки для фиксации подставной направляющей. Эта подставная направляющая обеспечивает тороидальную непрерывность внешней направляющей перед нижними портами.

Кассета дивертора прикреплена к тороидальным опорным направляющим, встроенным в вакуумную камеру. Внутренняя система крепления позволяет вращение во всех направлениях, а внешняя блокировка позволяет вращение только вокруг тороидальной оси, в то время как тороидальное и полоидальное перемещение блокируется опорами. Кассеты устанавливаются в вакуумную камеру с номинальным зазором 20 мм между соседними кассетами для проведения оптической диагностики и учета допусков при изготовлении и монтаже.

После всестороннего трехмерного обследования нижней части вакуумной камеры выполняется специальная обработка жестких накладок на направляющих. Эта операция обеспечивает точное позиционирование жестких накладок при сохранении ожидаемых

допусков при изготовлении и сборке вакуумной камеры. Вертикальный шаг между соседними пластинами покрытия в тороидальном направлении должен быть ограничен до $\pm 0,5$ мм. Конструкция основана на том, что корпус кассеты действует как пружина для удержания кассеты на месте, создавая подпружинивание между опорами, примыкающими к внутренним и наружным тороидальным направляющим.

Как внутренние, так и наружные фиксирующие элементы, так называемые «нос» и «кулак», изготовлены из никелевой бронзы. Форма носовой части обеспечивает механический замок, позволяющий избежать расцепления при динамических нагрузках. На рисунке 5.22 показан процесс блокировки кассеты дивертора. Кассета дивертора перемещается в приблизительное положение (внутреннее крепление изначально выровнено по центру внутреннего гнезда в пределах ± 5 мм по тороидальному направлению). На этом этапе «нос» свободно расположен на внутренней твердой накладке.

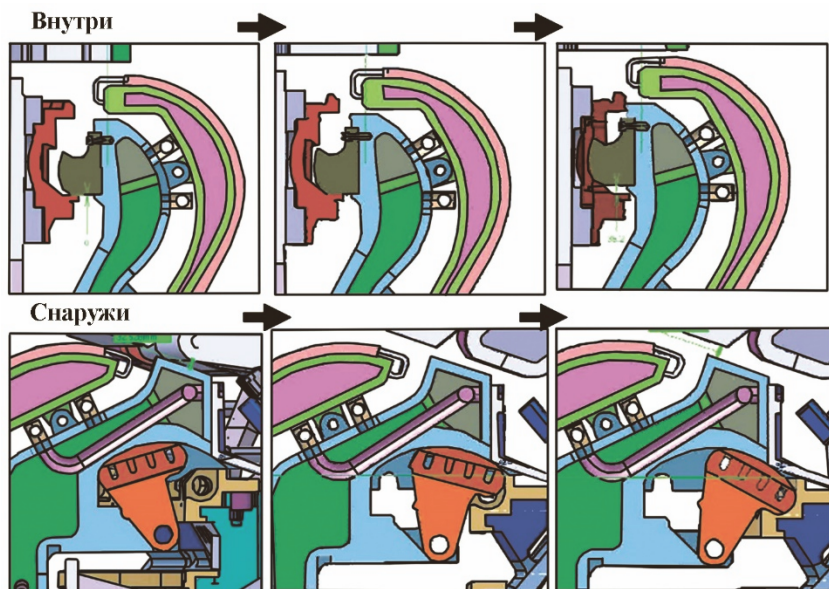


Рис. 5.22. Фиксация кассеты дивертора на направляющих

Цилиндрический конец «кулака» вставляется во внешнюю жесткую накладку. Затем вставляется разъем и к соединению прикладывается нагрузка. При приложении нагрузки внутреннее крепление входит в зацепление с внутренней жесткой накладкой, и кассета дивертора направляется в правильное конечное положение, поскольку кассета сжимается в радиальном направлении путем приложения радиальной предварительной нагрузки (~ 10 тонн, 5 мм смещение) с помощью домкратной системы. Это гарантирует то, что отклоняющая кассета остается в контакте с опорами при любых условиях нагрузки.

Нижние упоры, как часть вакуумной камеры, расположены между нижней стороной кассет дивертора и внутренней поверхностью вакуумной камеры для уменьшения тороидального смещения кассеты дивертора при динамических нагрузках. Это точка максимального смещения, а также точка, в которой требуется минимальное усилие для компенсации крутящего момента. В процессе установки, когда кассета дивертора достигает своего тороидального положения, ее толкают внутрь, чтобы зацепить за внутреннее крепление к вакуумной камере. Таким образом, нижний упор также входит в зацепление с пазом, который находится в кассете дивертора.

5.12. Техническое обслуживание дивертора

В связи с эрозией/повреждением обращенных к плазме компонент дивертора и возможной необходимостью улучшения конструкции критически важных элементов предусматривается замена дивертора трижды в течение 20 лет эксплуатации ИТЭР. Поэтому дивертору присвоен класс обслуживания с дистанционным управлением RH 1. Для удовлетворения этого требования был выбран дивертор кассетного типа. Концепция кассеты является основополагающей для технического обслуживания, поскольку она позволяет ограничиться установкой небольшого количества встроенных компонентов внутри корпуса, что сводит к минимуму операции технического обслуживания внутри корпуса и обеспечивает разумное время технического обслуживания и достаточную надежность.

Сборка дивертора состоит из двух основных подсистем: обращенных к плазме компонент, которые требуют замены, и корпуса кассеты (выполняющего функции несущей конструкции, экранирования и коллектора), которые могут быть использованы повторно. Удаленная замена разрушенных/поврежденных обращенных к плазме компонент, которые могут быть активированы, должна выполняться вне вакуумной камеры.

Максимальное время работы для замены одной кассеты дивертора зависит от тороидального расположения кассеты относительно порта дистанционного управления. В среднем это составляет около восьми недель. Максимальное время работы для замены полного комплекта диверторов (54 кассеты) должно составлять шесть месяцев. Техническое обслуживание дивертора выполняется путем «автономного» ремонта (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Автономный ремонт дивертора:

КОП – компонента, обращенная к плазме; КК – корпус кассеты

Это требует, чтобы полный запасной комплект корпусов кассет был готов к установке новых обращенных к плазме компонент. Фактически, эти (новые или отремонтированные) кассеты могут быть подготовлены и полностью протестированы во время эксплуатации (в несколько лет по сравнению с шестимесячным временем восстановления, выделенным на оперативное восстановление).

Преимущество автономного ремонта заключается в том, что он оказывает предсказуемое влияние на эксплуатационную готовность оборудования и может быть хорошо спланирован.

Описание основных параметров дивертора представлено в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Основные параметры дивертора

Параметр	Значение
Размер:	
тороидальная протяженность кассеты	6,67°
количество кассет	54
Дистанционное управление	Запланированы 2 замены за время работы в течение 20 лет и 1 замена на случай нештатной ситуации
Требуемое время замены	Автономный ремонт < 6 месяцев на все кассеты < 8 недель на одну кассету (в зависимости от тороидального расположения кассеты, исключая время выключения/запуска машины для извлечения кассет)
Тип охлаждающей жидкости:	Вода
Температура на входе (°C)	100
Входное давление на заглушках труб (МПа)	4,2
Макс. допустимый перепад давления (МПа)	1,6
Макс. допустимый расход (кг/с)	1000
Расчетное давление (МПа)	5,0
Материалы	
Корпус кассеты и опорные конструкции обращенных к плазме компонент	316L(N)-IG и XM-19
Радиатор обращенных к плазме блоков	Сплав CuCrZr-IG
Покрытие	CFC композит из углеродного волокна, чистый спеченный и деформированный

Параметр	Значение
Размер:	
Трубы	316L
Штифты многозвенных насадок	C63200 Ni-Al бронза
Внутренняя и наружная система запираания: нос и кулак	C63200 Ni-Al бронза
Внешняя система блокировки: соединительный вал	Сталь 600
Внешняя система блокировки: подвижные штифты	Сталь 600
Болты/шайбы	660 сталь/Inconel 718
Жесткие накладки на направляющие дивертора	Сталь 600
Срезные штифты жестких накладок	C63200 Ni-Al бронза
Расчетная нагрузка на мишень в зоне поражения	~ 10 МВт/м ²
Расчетная нагрузка на мишень в области отражения	~ 5 МВт/м ²
Расчетный пиковый тепловой поток для медленных переходных процессов (макс. 10 с)	20 МВт/м ²
Макс. допустимая скорость утечки	$< 10^{-8}$ Па·м ³ ·с ⁻¹
Запас до кризиса теплообмена	1,4
Площадь обращенной к плазме поверхности	~ 210 м ²
Класс безопасности по важности	Не относится к SiC
Класс качества	1
Классификация вакуума	VQC-1A
Сейсмический класс	SC2

Контрольные вопросы и задания

1. Какой цели служит система бланкета?
2. Как крепится панель первой стенки?
3. Как осуществляется охлаждение бланкета?

4. Каково оптимальное соотношение сталь/вода/пустота для защиты от нейтронов?
5. Что дает увеличение толщины внутренних модулей бланкета?
6. Чему равно количество модулей бланкета? Каковы типичные размеры модуля и максимальная масса?
7. Какова общая тепловая нагрузка в бланкете?
8. Назовите, из чего состоит каждый модуль бланкета.
9. Из чего состоит панель первой стенки и из какого материала она изготовлена?
10. С какой целью панель первой стенки изготовлена из пальцев?
11. Из каких элементов состоит каждый палец? Назовите материалы этих элементов.
12. Назовите панели, которые являются наиболее проблемными с точки зрения боковой тепловой нагрузки.
13. Зачем нужны технологии с высоким тепловым потоком для компонентов порта с углублением менее 40 мм?
14. Как создается защита порта и краев панели от высоких тепловых нагрузок?
15. Как достигается максимальная эффективность ядерной защиты?
16. В чем отличительная особенность передней поверхности блока защиты по сравнению с задней поверхностью с точки зрения нагрева?
17. Из чего состоит механическое крепление модуля бланкета к вакуумной камере?
18. Для чего на механические крепления наносятся электроизоляционные покрытия?
19. В чем заключаются функции гибких опор?
20. Каким воздействиям подвергаются межмодульные ключи?
21. Благодаря какому покрытию уменьшается трение поверхностей скольжения накладок ключей?
22. В чем особенность распределения тепловой нагрузки на первую стенку?

23. Чему равна тепловая нагрузка для наиболее нагруженных панелей и для наименее нагруженных?
24. Как устанавливается блок защиты и панель первой стенки blankets?
25. Сколько лет эксплуатации должны выдерживать модули blankets?
26. Почему существует требование разрешить замену и ремонт панелей первой стенки чаще, чем один раз в 20 лет?
27. Требуяют ли замены блоки защиты? Почему?
28. Назовите количество кассетных сборок, из которых состоит дивертор ИТЭР.
29. Из чего состоит купол дивертора?
30. Для чего обращенные к плазме компоненты дивертора располагают под углом?
31. Что является образцовой конфигурацией для дивертора ИТЭР? К какому режиму работы плазмы она приводит?
32. Какой расчетный тепловой поток на нижний сегмент вертикальной пластины дивертора предполагается при нормальной эксплуатации?
33. Сколько вертикальных мишеней содержит одна кассета дивертора?
34. Назовите материал, из которого изготовлена плиточная облицовка блоков, обращенных к плазме.
35. Какова величина зазоров между вольфрамовыми плитками на полоидальной средней плоскости купола? Для чего нужны эти зазоры?
36. Каковы функции корпуса кассеты дивертора?
37. Из чего изготовлен корпус кассеты, каковы его размеры и масса? Чему равна масса всего дивертора в сборе?
38. Чем определяется минимальная радиальная толщина корпуса кассеты?
39. Как фиксируется кассета на направляющих дивертора?
40. Как расположены нижние упоры вакуумной камеры? Какова их роль?
41. Как часто предусматривается замена дивертора?

Список рекомендуемой литературы

1. Глухих, В.А. Физико-технические основы управляемого термоядерного синтеза: учеб. пособие / В.А. Глухих, В.А. Беляков, А.Б. Минеев. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006.
2. Кадомцев, Б.Б. От МТР до ITER / Б.Б. Кадомцев. – Успехи физических наук. – Т.166. – 1996. – №5. – С.449–458.
3. Кирнева, Н.А. Современные исследования на установках «Токамак»: учеб. пособие / Н.А. Кирнева. – М.: МИФИ, 2008.
4. Миямото, К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза: пер. с англ. под ред. В.Д. Шафранова / К. Миямото – М.: Физматлит, 2007.
5. Смирнов, В.П. Термоядерная энергетика – крупнейший международный инновационный проект / В.П. Смирнов // Российский химический журнал. – Т. LI. – 2008. – №6. – С. 79–94.

III. ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ИТЭР

ГЛАВА 6. КРИОВАКУУМНАЯ ОТКАЧКА

6.1. Общая характеристика вакуумной системы

Создание рабочих условий для формирования, нагрева и удержания плазмы, а также для средств дополнительного нагрева ее, системы криостатирования, обеспечение условий ввода в установку трития и дейтерия возможно лишь в условиях высокого и сверхвысокого вакуума. Вакуумная система термоядерного реактора совместно с тритиевым контуром образует вакуумно-тритиевый комплекс. Основные элементы вакуумной системы термоядерного реактора с магнитным удержанием показаны на рис. 6.1.

Основные параметры вакуумной системы ИТЭР приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные параметры вакуумной системы ИТЭР

Параметр	Значение
Большой/малый радиус	6,2 м/2,0 м
Объем плазмы	837 м ³
Площадь поверхности плазмы	678 м ²
Общий поток смеси газов	75 моль/ч
Необходимая быстрота откачки по гелию	700 м ³ /с
Фоновое давление	$p_{\phi} \leq 4 \cdot 10^{-5}$ Па
Рабочее давление в конце периода горения топлива	$p_{\text{раб}}^{\text{max}} \leq 4 \cdot 10^{-3}$ Па

В настоящее время сформулированы исходные требования, разработана концепция вакуумной системы, предполагающая использование для откачки разрядной камеры международного термоядерного экспериментального реактора комплекса откачных станций. В различных режимах работы вакуумной системы используются следующие насосы:

а) турбомолекулярные насосы – в режиме фоновой откачки – откачка от атмосферного давления до рабочих давлений на начальной стадии, а затем применяются криогенные насосы:

– на этапе течеискания и прогрева;

– в режиме технологической очистки поверхностей стенок разрядной камеры в тлеющем разряде в гелии;

б) турбомолекулярные насосы или криогенные насосы на этапе очистки поверхностей стенок в тлеющем разряде в дейтерии;

в) криогенные насосы:

– в рабочем режиме – режиме горения топлива;

– в паузе между горением топлива.

В качестве основного средства вакуумной откачки реактора выбраны криосорбционные насосы.

В связи с геометрической сложностью, исключающей возможность использования аналитического подхода, при проектировании вакуумной системы применялась программа численного расчета и структурно-геометрической оптимизации откачного (вакуумного) тракта. В основе разработанной программы лежит метод Монте-Карло в трехмерной постановке. В качестве переменных параметров использовались: геометрические характеристики откачного тракта (форма и площадь поперечного сечения каналов, их ориентация в пространстве, зазор между диверторной каскетой и стенкой вакуумной камеры и др.); состав, поток и температура откачиваемых газов; число насосов, работающих в режиме откачки и регенерации, их быстрота действия и ее изменение по мере насыщения сорбента или роста толщины криоосадка. Программа использовалась для расчета и сопоставительного анализа различных вариантов диверторных каскет, оптимизации геометрических размеров откачных трактов, выбора оптимальных режимов регенерации крионасосов, анализа нештатных и аварийных ситуаций. Особое внимание уделялось проблеме исключения утечек трития. Выполнялись качественная оценка характера и последствий гипотетических неисправностей элементов вакуумной системы и анализ ее эксплуатационной надежности. В качестве критериев надежности использовались коэффициент готовности вакуумной системы и вероятность ее

безотказной работы в непрерывном режиме. Выявлялись критичные элементы, надежность системы повышалась путем резервирования наиболее критичных элементов.

В качестве конкретного примера можно привести коэффициент готовности системы откачки криостата, который изменяется от 0,9996 в начале эксплуатации реактора до 0,999 в конце срока службы. Вероятность безотказной работы системы в непрерывном режиме в течение двух недель составляет 0,9989.

Рабочей группой по проектированию вакуумной системы ИТЭР подготовлены информационно-технические материалы для справочника «Вакуумные технологии», входящего в комплект проектной документации по ИТЭР. В этом справочнике обобщен мировой опыт создания и эксплуатации вакуумных систем термоядерных установок.

Вакуумная система должна обеспечивать на выходе из дивертора откачку общего потока смеси газов 75 моль/ч, которая включает в себя 93,7% ДТ-смеси и 3,3% гелия. При этом необходимая быстрота откачки по гелию, синтезированной во время ядерной реакции мощностью 1000 МВт, равна 700 м³/с на выходе из дивертора.

Вакуумная система по откачке разрядной камеры реактора состоит из восьми откачивающих станций, каждая из которых включает в себя три криогенных насоса, два из которых находятся в рабочем режиме (режиме откачки), а один – в режиме регенерации. Таким образом, в рабочем режиме одновременно находятся 16 криогенных насосов, а в режиме регенерации – 8 насосов.

Каждая откачивающая станция соединяется с диверторной камерой двумя радиальными каналами диаметром по 2 м, которые, в свою очередь, объединяются одним поперечным каналом диаметром 1,25 м, где и установлены три криогенных насоса.

Расчетная быстрота действия одного криогенного насоса по гелию принята $S_n = 100$ м³/с при диаметре входного патрубка, равном 1 м, наружном диаметре криогенного насоса $d_n = 1,5$ м и его высоте $h = 3$ м.

Схема расположения криогенных насосов приведена на рис. 6.1.

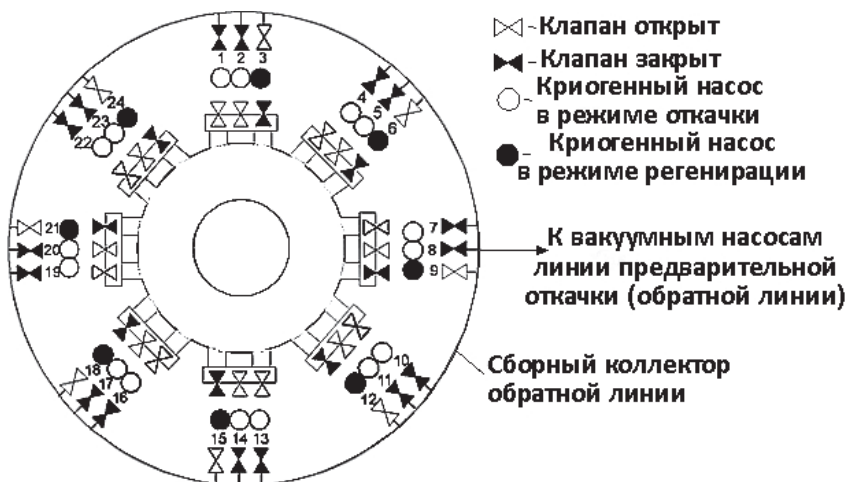


Рис. 6.1. Схема расположения криогенных насосов:
1–24 – номера насосов

Общая проводимость по гелию 16 каналов откачки и 8 поперечных каналов $U_{\Sigma}^{\text{He}} = 1245 \text{ м}^3/\text{с}$. Согласно основному уравнению вакуумной техники

$$\frac{1}{S_{\text{эф}}^{\text{He}}} = \frac{1}{S_{\text{н}\Sigma}^{\text{He}}} + \frac{1}{U_{\Sigma}^{\text{He}}},$$

суммарная быстрота действия криогенных насосов

$$S_{\text{н}\Sigma}^{\text{He}} = \frac{S_{\text{эф}}^{\text{He}} U_{\Sigma}^{\text{He}}}{U_{\Sigma}^{\text{He}} - S_{\text{эф}}^{\text{He}}} = 1600 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Соотношение длительности рабочего режима откачки и продолжительности режима частичной регенерации криогенного насоса устанавливается в первую очередь из условия максимально допустимого количества накопленного трития, которое не должно превышать 150 г. Рабочий цикл одного крионасоса продолжительностью 120 мин включает в себя 80 мин в режиме откачки и 40 мин в режиме регенерации. За этот цикл откачиваемый газ и аргон в количестве 12,4 моль, аккумулируется в насосе. К концу этого периода в одном насосе накапливается $Q_0 = 17,58 \text{ г}$ трития. С целью избежать

превышения предельно допустимого накопления трития цикл работы соответствующих криогенных насосов откачных станций смещается на 5 мин (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Схема цикличности работы криогенных насосов:

T – период работы; Q – количество накопленного в насосе трития

Криогенный насос состоит из трех ступеней:

- первая ступень, называемая защитным экраном, охлаждается принудительным потоком газообразного гелия при температуре $T = 90$ К и откачивает конденсацией легкоконденсируемые примеси, главным образом пары воды и аммиака;

- вторая и третья ступени охлаждаются потоком жидкого гелия при $T \approx 4$ К. Вторая ступень откачивает конденсацией, главным образом дейтерий и тритий, в то время как третья ступень откачивает гелий. Основным механизмом откачки гелия является криозахват потоком распыляемого аргона. Альтернативным решением может быть сорбция гелия на твердом адсорбенте – активированном угле.

Полный цикл работы криогенного насоса равен 2 суткам, по истечении которых производится режим полной регенерации. Регенерация заключается в нагреве криогенных насосов, последующем испарении и десорбции сконденсированных и адсорбированных газов соответственно. Во время регенерации насосы отключаются от разрядной камеры.

6.2. Описание системы вакуумной откачки разрядной камеры

К системе вакуумной откачки разрядной камеры предъявляются следующие основные требования:

– обеспечение фонового давления $p_{\text{ф}} \leq 4 \cdot 10^{-5}$ Па, рабочего давления в конце периода горения топлива не выше $p_{\text{раб}}^{\text{max}} \leq 4 \cdot 10^{-3}$ Па при общем потоке газов $Q_{\Sigma} = 75$ моль/ч, в том числе потоке гелия $Q^{\text{He}} = 2,46$ моль/ч при эффективной скорости действия по гелию на выходе из дивертора $S_{\text{эф}}^{\text{He}} = 700$ м³/с.

Разработанная вакуумная система подлежит длительным тестовым испытаниям, включающим четыре стадии по 9 месяцев каждая. Длительность непрерывной работы во время тестовых испытаний составляет 10 ч.

Краткое описание процессов откачки компонентов смеси газов сводится к следующему:

– молекулы топлива (дейтерий и тритий) и примесей теряют свою энергию при столкновении с холодными поверхностями первой ($80 \leq T_1 \leq 100$ К) и второй ($2,5 \leq T_2 \leq 4$ К) ступеней, на которых более 90% из них остаются после первого соударения. Эти процессы идут до тех пор, пока давление газов остается выше, чем давление насыщенного пара, соответствующее температуре криопанели. В конце 80-минутного рабочего цикла откачки толщина твердого криоосадка не должна превышать $1 \cdot 10^{-3}$ м на криопанелях первой ступени и $6 \cdot 10^{-3}$ м на криопанелях второй ступени (по оценочным расчетам автора);

– на третьей ступени откачка гелия осуществляется путем так называемого криозахвата, суть которого заключается в том, что распыляемый поток легкоконденсируемого газа (аргона) захватывает молекулы трудноконденсируемого газа (гелия) и осаждается в виде инея (криоосадок) на поверхности криопанели третьей ступени, замуровывая при этом молекулы гелия.

Параметры криозахвата следующие:

1) соотношение потоков распыляемого и захватываемого газов $Q^{\text{Ar}} / Q^{\text{He}} = 30/1$. В дальнейшем планируется провести оптимизацию этого соотношения;

2) давление распыляемого аргона $p_{Ar} = 1 \cdot 10^4$ Па, а температура $T_{Ar} = 80$ К;

3) удельная быстрота откачки гелия $S_{уд}^{He} = 20$ м³/(м²·с).

К основным достоинствам аргонного криозахвата относятся:

- изготовление криопанелей третьей ступени из чистого металла, без каких-либо покрытий;
- простота выполнения режима регенерации;
- нечувствительность к «отравлению» другими газами;
- неограниченный ресурс работы.

Главным же недостатком этого способа откачки является то, что включение в технологический процесс добавочного газа (аргона) требует создания дополнительной системы сепарации.

Толщина криослоя, в основном состоящего из гелия и аргона, к концу 80-минутного цикла откачки не должна превышать $5 \cdot 10^{-3}$ м.

В таблице 6.2 приведены процессы откачки различных газов ступенями криовакуумного насоса.

Таблица 6.2

Процессы откачки на разных ступенях криовакуумного насоса

Откачиваемые газы	Механизм откачки	Номер ступени	Рабочая температура ступени, К
Примеси: H ₂ O, NH ₃	Криоконденсация	1	80÷100
Примеси: N ₂ , O ₂ , CO ₂ , CO, Ar, C _n H _m . Топливо: H, ДТ-смесь	Криоконденсация	2	2,5÷4,0
He	1. Криозахват He на слое криосадка сконденсированного Ar. 2. Альтернатива: криосорбция на активированном угле или другом твердом адсорбенте	3	2,5÷4,0

Быстрота откачки отдельных компонентов смеси газов представлена в табл. 6.3.

Теоретическая скорость откачки при молекулярном режиме течения ($p < 3 \cdot 10^{-2}$ Па), приведенная в табл. 6.3, рассчитывается по соотношению

$$S_T^{уд} = \frac{N_q}{n} = \frac{nv_{ср.кв}}{4n} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = 1,15 \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (6.1)$$

где $T = T_{вх} = 300$ К.

При этом коэффициент захвата равен единице и быстрота откачки будет максимальной возможной. Удельная быстрота действия на входе в насос, $м^3/(м^2 \cdot с)$:

$$S_H^{уд} = S_T^{уд} \alpha_H,$$

где α_H – коэффициент захвата на входе в насос.

Таблица. 6.3

Быстрота откачки по компонентам

Газ	μ , кг моль	$S_T^{уд}$, $\frac{м^3}{м^2 \cdot с}$	Номер ступени	Температура ступени, К	Давление p_s при $T_{ст}$, Па, не более	Кэфф. захвата α_H	$S_H^{уд}$ на входе $\frac{м^3}{м^2 \cdot с}$	S_i/S_{He}	S_H , м ³ /с	$S_E=16S_H$ м ³ /с
H ₂ O	0,018	148	1	90	<10 ⁻⁸	0,95	140,6	1,06	110	1760
D ₂ O	0,020	141			<10 ⁻⁸	0,95	134,0	1,01	105	1680
NH ₃	0,017	153			<10 ⁻⁶	0,95	145,4	1,10	114	1824
CO ₂	0,044	95	2	4	<10 ⁻⁸	0,95	90,3	0,68	70	1120
CH ₄	0,016	157			<10 ⁻⁸	0,78	122,5	0,93	96	1536
O ₂	0,032	111			<10 ⁻⁸	0,78	86,6	0,65	68	1088
CO, N ₂	0,028	119			<10 ⁻⁸	0,78	119,0	0,90	93	1488
Ar	0,040	100			<10 ⁻⁸	0,78	78,0	0,59	61	976
T ₂	0,006	257			<10 ⁻⁸	0,77	197,9	1,50	155	2480
ДТ- смесь	0,005	282			<10 ⁻⁸	0,77	217,1	1,64	170	2720
D, HT- смесь	0,004	315			<10 ⁻⁸	0,77	242,6	1,83	190	3040
H ₂	0,002	445	3	4	10 ⁻⁵	0,77	342,7	2,59	259	4144
He	0,004	315			–	0,42	132,3	1,0	100	1600

Быстрота действия насоса определяется по формуле

$$S_H = F_{вх.п} S_H^{уд},$$

где $F_{вх.п} = \frac{\pi d_{вх.п}^2}{4}$ – площадь поперечного сечения впускного патрубка.

6.3. Режимы работы криовакуумного насоса

Режимы работы криовакуумных насосов, входящих в систему вакуумной откачки ИТЭР, приведены в табл. 6.4.

Режим захлаживания

В этом режиме клапан вакуумного канала (клапан тора), соединяющего насос с диверторной камерой, закрыт. Внутренний объем криогенного насоса с помощью вакуумной системы линии предварительной откачки откачивается до давления ниже 1 Па, и затем клапан этой линии закрывается.

Все три ступени охлаждаются до 90 К за счет циркуляции газообразного гелия при температуре 80 К и давлении $p = 20 \cdot 10^5$ Па, а затем вторая и третья ступени охлаждаются вначале за счет циркуляции газообразного гелия при 20 К и $p = 20 \cdot 10^5$ Па, а далее – переохлажденного жидкого гелия при $T = 2,5 \div 4,0$ К.

Режим ожидания

Готовый к работе криогенный насос, изолированный клапанами от тора и линии предварительной откачки, выдерживается некоторое время при низкой температуре под вакуумом. Заметим, что при ограниченном натекании через негерметичный регенерационный клапан, накопление трития в насосе должно быть небольшим менее, 1 г за 24 ч при давлении в торе $2 \cdot 10^{-2}$ Па и скорости натекания в 1 насосе $1,8 \cdot 10^{-2}$ м³/с.

Режим откачки

Клапан тора открыт, и газовый поток из диверторной камеры поступает в насос, далее откачка идет по схеме, описанной выше.

Режим частичной регенерации

Клапан тора закрыт, насос нагревается до 80 К. Происходят десорбция газов на третьей ступени и испарение на второй ступени криогенного насоса. Эти газы откачиваются насосами линии предварительной откачки, клапан этой линии открыт в течение 5 мин. После откачки до давления 10 Па криогенный насос вновь захлаживается по схеме, описанной выше. Время частичной регенерации составляет 40 мин. В каждый момент времени с линией предварительной откачки в течение 5 мин соединен только один криогенный насос.

Режим полной регенерации

Клапан тора закрыт. Криогенный насос нагревается до 300 К. При этом все газы, захваченные этим насосом, освобождаются и откачиваются насосами линии предварительной откачки. После откачки до давления ниже 10 Па, криогенный насос вновь захлаживается. Длительность режима полной регенерации составляет примерно 2 ч.

Приведем основные причины, ведущие к аварийному режиму работы крионасоса.

Внешними причинами являются:

– наличие давления более 10 Па в торе или на входе в дивертор в течение длительного времени (вследствие натекааний воздуха, воды или других компонентов);

– неисправность клапана тора;

– неисправность клапана линии предварительной откачки;

– неисправность системы насосов линии предварительной откачки.

К неисправностям крионасосов или системы захлаживания (охлаждения) можно отнести:

– течь внешней арматуры насоса;

– течи внутреннего криогенного контура;

– течи криогенных клапанов;

– разгерметизация криопанелей;

– неисправность рефрижератора;

– неисправность систем контроля и управления;

– механические повреждения;

– трещины на внутренней поверхности вследствие термических напряжений.

Таблица 6.4

Режимы работы насоса

Процесс	Положение клапанов		Давление, Па	Температура ступеней, К		Максимальное количество				Потребляемая мощность, Вт					
	Тор	Линия предв-рительной откачки		первой ступени	второй ступени	газа в первой ступени, моль	газа во второй и третьей ступенях, моль	ДТ-смеси, моль	Т, г	одного насоса	всей системы насосов (24/8), включая систему распределения				
											80	20	4	80	20
Охлаждение (2°)	3	0↓3	< 10 ⁻²	300↓90	300↓4	0	0	0	0	8000	500	4	–	–	–
Режим ожидания	3	3	10 ⁻⁵	90	4	–	–	–	–	600	–	20	1500	0	500
Режим откачки	0	3	4·10 ⁻³	90	4	1,5·10 ⁻² ·η	12,4	5,9	17,6	700	–	40	2000	1200	13000
Частичная регенерация (40 мин.)	3	3–0–3	8,2·10 ⁻² ↓10	90	4↑80↓4*	1,5·10 ⁻² ·η	0	0	0	1000	1000	20	0	0	0
Полная регенерация (2 часа)	3	3–0–3	820	300	300	0	0	0	0	10000	500	20	–	–	–

Примечание: здесь «0» – соответствующий клапан открыт; «3» – то же закрыт; η – число рабочих циклов после полной регенерации; * – стрелки указывают на снижение параметров от максимального значения до минимального или на повышение значения до максимального.

6.4. Сепарация аргона

Как отмечалось выше, откачка гелия с использованием механизма криозахвата является весьма эффективной – удельная быстрота откачки достигает $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Однако введение потока добавочного газа (73,8 моль/ч) требует создания дополнительной системы сепарации аргона от смеси газов, выводимых из разрядной камеры. Схема циркуляции откачиваемых газов и аргона в системе вакуумной откачки разрядной камеры ИТЭР изображена на рис. 6.3.

Поток откачиваемого газа (75 моль/ч) на выходе из диверторной камеры тора 1 (точка А на рис. 6.3) поступает в систему из 16 каналов откачки, по которым подается на вход 16 криогенных насосов 3, работающих в режиме откачки.

К третьей ступени этих насосов подается газообразный аргон из буферной емкости 8, предназначенной для хранения и дезактивации. Поток смеси газов (148,8 моль/ч) из восьми криогенных насосов 2 (точка В на рис. 6.3), находящихся в режиме регенерации, поступает в насос криоразделения 4.

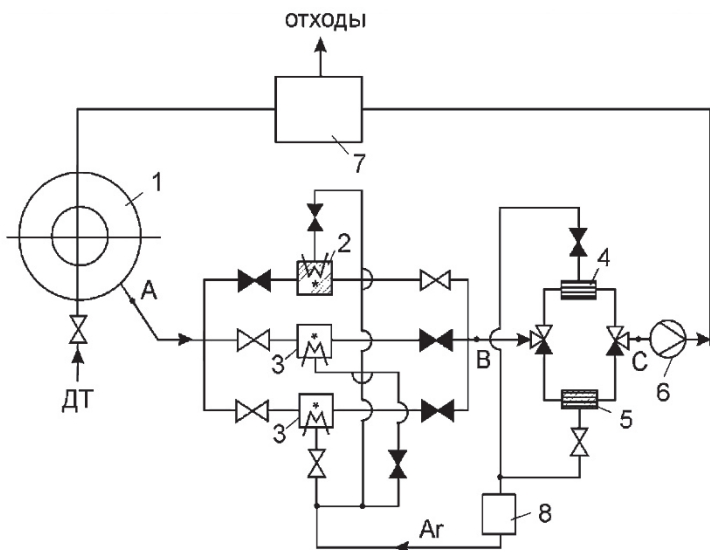
Насос криоразделения смеси газов, работающий при температуре примерно 30 К, захватывает аргон и другие примеси, в то время как другие газы (дейтерий, тритий, гелий) не конденсируются и откачиваются вакуумными насосами линии предварительной откачки 6. В блоке производится очистка ДТ-смеси от гелия и примесей.

На рисунке 6.4 изображено распределение рабочих параметров в криоразделительном насосе во времени.

После насыщения насос криоразделения смеси газов 5 переходит в режим регенерации и испарившейся из него аргон направляется в буферную емкость 8 для дезактивации. Отметим, что хранение аргона в жидком состоянии позволяет уменьшить объем этой емкости.

После одного дня дезактивации аргон возвращается в систему хранения для последующей подачи в распылительную систему крионасосов.

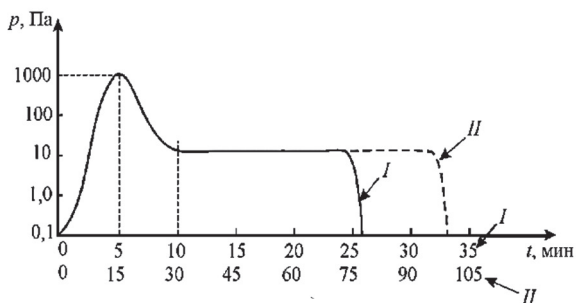
При осуществлении рециркуляции аргона необходимо контролировать состав примесей в нем, чтобы избежать достижения значений парциального давления компонентов примесей, соответствующих давлению тройной точки при температуре подачи аргона $T = 80 \text{ К}$.



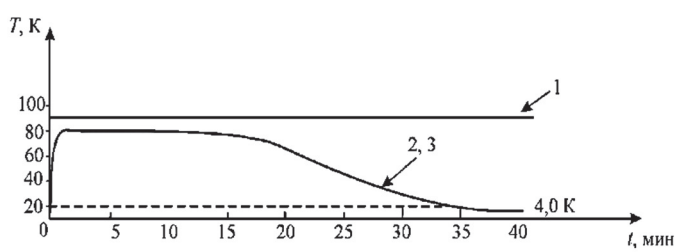
Параметры потоков смеси газов в точках В и С

Точка	$T, \text{ К}$	$P, \text{ Па}$	$Q, \text{ моль/ч}$				
			ДТ-смесь	He	H_2	Ar	Примеси
В	300	10	70,29	2,46	0,75	73,8	1,5
С	300	10	67,39	2,46	0,75	0,72	0,36

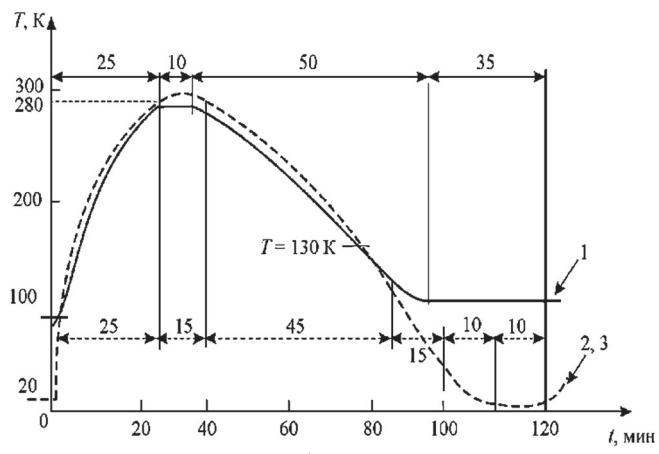
Рис. 6.3. Схема циркуляции откачиваемых газов



а)



б)



в)

Рис. 6.4. Изменение температуры и давления в криогенном насосе в режимах регенерации и охлаждения:

I – частичная регенерация; *II* – полная регенерация;

а – изменение давления; б – изменение температуры в режиме частичной регенерации;

в – то же в режиме полной регенерации;

1–3 – первая – третья ступени соответственно

6.4. Конструкция криовакуумного насоса

Система криогенного обеспечения насоса и его конструкция показаны на рис. 6.5. и 6.6. Система криогенного обеспечения насоса включает в себя узлы подачи газообразного гелия на трех уровнях температур: 373, 90, 20 К, жидкого гелия при 2,5÷4,0 К и газообразного аргона при температуре $T = 80$ К и давлении $p = 1 \cdot 10^4$ МПа. Ввод криогенных теплоносителей и аргона осуществляется через блок криогенных клапанов 10. Для отключения криогенного насоса от каналов откачки, соединяющих его с диверторной камерой, предназначен клапан тора 7, а от линии предварительной откачки клапан клапан 9. Конструкция криогенного насоса состоит из трех ступеней.

Первая ступень 1 выполняет совмещенные функции теплозащитного экрана и ступени откачки легкоконденсируемых газов и представляет собой набор конических колец оптически непроницаемых и расположенных горизонтально. Эта ступень охлаждается газообразным гелием при $T = 80 \div 100$ К, подающимся через блок криогенных клапанов, вертикальный раздаточный коллектор 14 к горизонтальным кольцевым трубам, припаянным к коническим кольцам ступени. Поток гелия и ДТ-смеси с вероятностью пролета $c = 0,4$ проходит через свободное пространство между коническими кольцами первой ступени; достигает криопанелей второй и третьей ступеней, представляющих собой набор вертикально ориентированных плоских пластин 2, 3, каждая из которых охлаждается жидким гелием при температуре 2,5÷4,0 К. Затем жидкий гелий прокачивается через горизонтальный раздаточный коллектор 8, набор вертикальных труб, приваренных, т.е. последовательно соединенных сваркой с криопанелями второй 2 и третьей 3 ступеней, и собирается в сборном коллекторе 9, через который гелий выводится из крионасоса.

Система распыления аргона включает горизонтальный раздаточный коллектор 5, 25 вертикальных труб 13 с 20 распылительными профилированными соплами на каждой трубе.

Тепловая защита криогенных ступеней от вакуумной оболочки 6 состоит из трех частей 10–12, охлаждение которых осуществляется за счет циркуляции гелия, поступающего после охлаждения первой ступени. Средняя температура теплозащитного экрана равна 100 К.

Материалы элементов крионасоса

Криооткачивающие панели, теплозащитный экран изготавливаются из алюминия, а корпус насоса, циркуляционные насосы, вакуумные и криогенные клапаны – из нержавеющей стали. Использование нержавеющей стали уменьшает расход гелия, однако при этом существенно увеличивается масса криогенного насоса.

Основные характеристики криовакуумного насоса приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Основные характеристики крионасоса

Показатель	Корпус – вакуумная оболочка с двойными стенками	Первая ступень $T = 100 \text{ К}$	Вторая (а) и третья (б) ступени $T = 4,0 \text{ К}$
Охлаждающий теплоноситель	–	Гелий, $p = 2,0 \text{ МПа}$, $T = 80 \div 100 \text{ К}$	а) газообразный гелий, $p = 2,0 \text{ МПа}$, $T = 4 \text{ К}$; б) жидкий гелий, $p \approx 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T = 2,5 \div 4 \text{ К}$
Диапазон рабочих температур, К	300÷400	~ 90	4/280
Внутренний объем, м ³	10	0,035	0,010
Площадь поверхности, обращенная в вакуум, м ²	23,3	25,8	23,9
Масса, кг	2200	242	182
Материал	Нержавеющая сталь	Алюминий	Алюминий
Потребляемая мощность, кВт	–	20	1,3

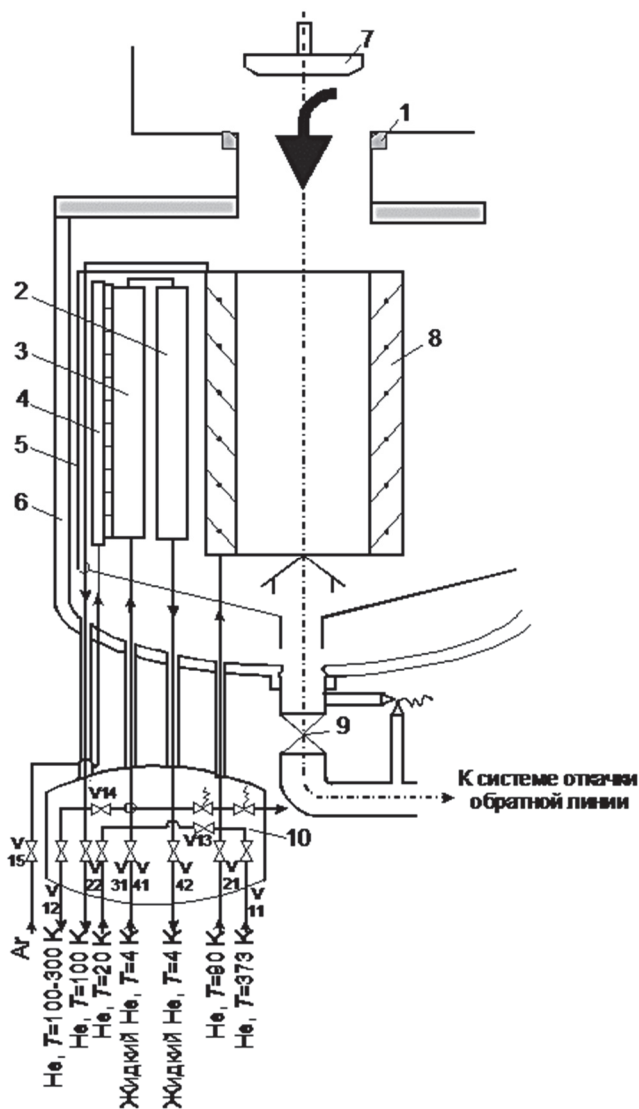


Рис. 6.5. Схема криогенного обеспечения крионасоса:

- 1 – присоединительный фланец; 2 – вторая ступень; 3 – третья ступень;
- 4 – трубы для распыления аргона; 5 – защитный экран ($T = 100\text{ K}$);
- 6 – вакуумная оболочка; 7 – клапан тора (регенерационный клапан);
- 8 – первая ступень (защитный экран);
- 9 – клапан линии предварительной откачки (выпускной клапан);
- 10 – блок криогенных клапанов

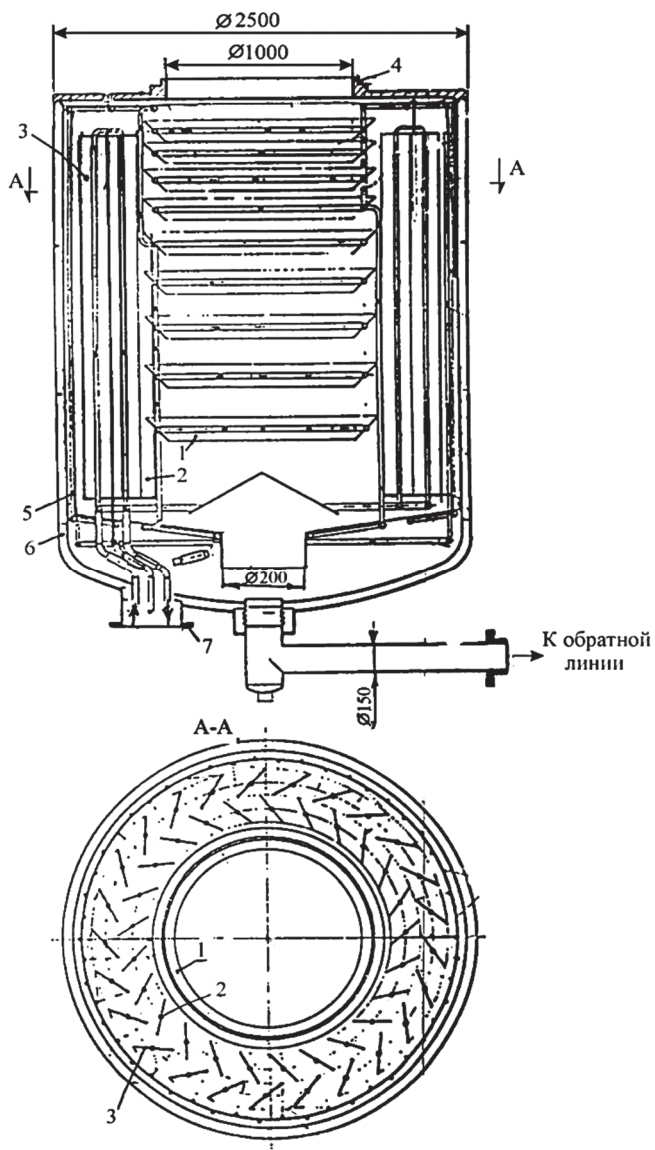


Рис. 6.6. Трехступенчатый криогенный насос:

- 1 – первая ступень; 2 – вторая ступень; 3 – третья ступень;
 4 – присоединительный фланец; 5 – система распыления Ar;
 6 – вакуумная оболочка; 7 – ввод криогенный теплоносителей

6.5. Компоновка вакуумной системы

Общие виды компоновки вакуумной системы ИТЭР приведены на рис. 6.7. и 6.8.

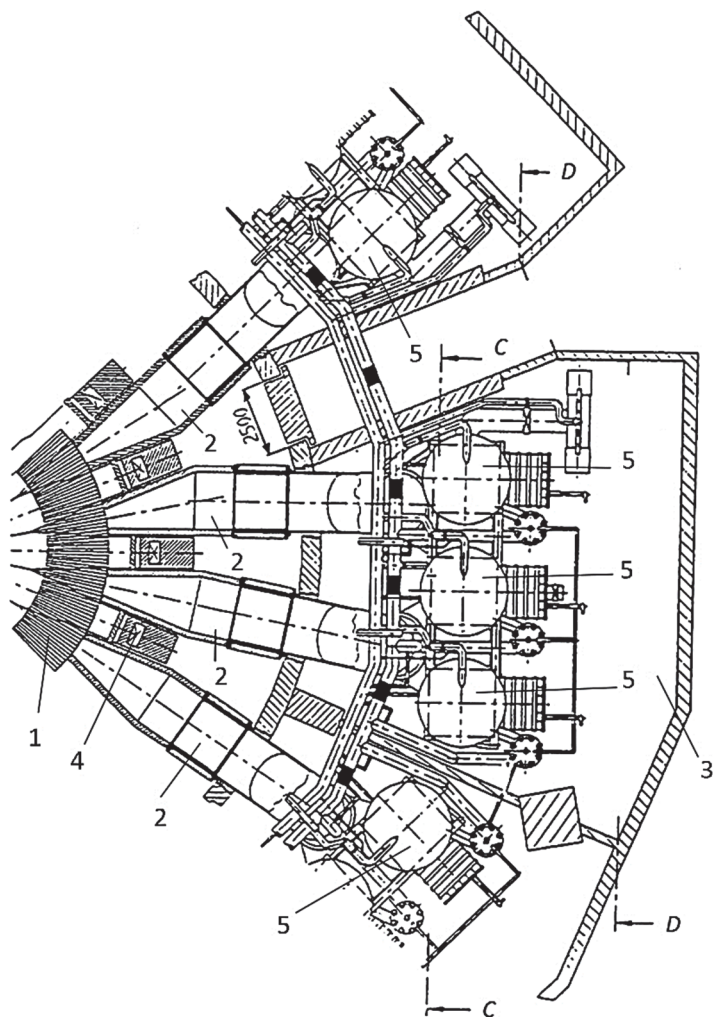


Рис. 6.7. Компоновка вакуумной системы ИТЭР (вид сверху):

- 1 – тор;
- 2 – каналы откачки;
- 3 – станция вакуумной откачки;
- 4 – сверхпроводящие обмотки магнитного поля;
- 5 – криогенные насосы

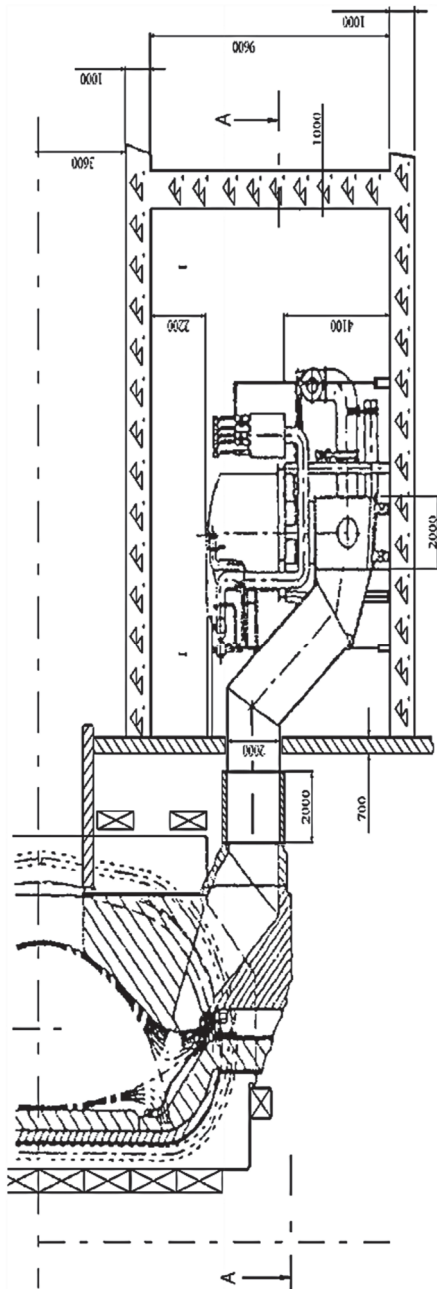


Рис. 6.8. Компонка вакуумной системы ИТЭР (вертикальный разрез)

Как видно из рисунков, вакуумная система ИТЭР имеет весьма значительные размеры – до 35 м в плане и в вертикальном разрезе перепад высот элементов этой системы достигает нескольких метров.

6.6. Расчет параметров криовакуумного насоса

6.6.1. Оценка необходимой эффективной быстроты откачки гелия

Конструкция криовакуумного насоса приведена на рис. 6.6.

Исходные данные расчета:

Поток смеси газов на выходе из разрядной камеры равен $Q = 75$ моль\час, рабочий период длительностью $\tau_p = 2$ часа.

А соответствующий поток частиц гелия $Q_{\text{He}}^* = \frac{Q}{\tau_p} N_A \gamma$,

где γ – доля гелия в потоке, $\gamma = 0,033$.

Тогда $Q_{\text{He}}^* = \frac{75}{3600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,033 = 8,30 \cdot 10^{20} \text{ с}^{-1}$.

С другой стороны, по определению поток газа это

$$Q = p \frac{dV}{dt} = nkT \frac{dV}{dt} = kT \frac{dN}{dt} \equiv kT \dot{N},$$

где $\frac{dN}{dt} \equiv \dot{N} = Q_{\text{He}}^*$ – поток частиц (атомов) в единицу времени.

Тогда поток гелия в единицу времени равен

$$Q = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 8,30 \cdot 10^{20} = 3,46 \text{ Па} \cdot \frac{\text{М}^3}{\text{с}}.$$

А эффективная скорость откачки гелия равна (рис. 6.9)

$$S_{\text{эф}} = \frac{Q}{p_{\text{рас}}} = \frac{3,46}{2 \cdot 10^{-3}} = 1730 \text{ М}^3/\text{с}.$$

Расчетное давление $p_{\text{рас}}$ определяется как среднее значение между фоновым и максимальным значениями давления:

$$p_{\text{рас}} = \frac{p_{\text{раб}}^{\text{min}} + p_{\text{раб}}^{\text{max}}}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-2}}{2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па,}$$

$$S_{\text{эф}}^{\text{нач}} = \frac{Q}{p_{\text{ф}}} = \frac{3,46}{2 \cdot 10^{-5}} = 8,65 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с,}$$

$$S_{\text{эф}}^{\text{кон}} = \frac{Q}{p_{\text{раб}}^{\text{max}}} = \frac{3,46}{4 \cdot 10^{-2}} = 4,325 \cdot 10^2 \text{ м}^3/\text{с.}$$

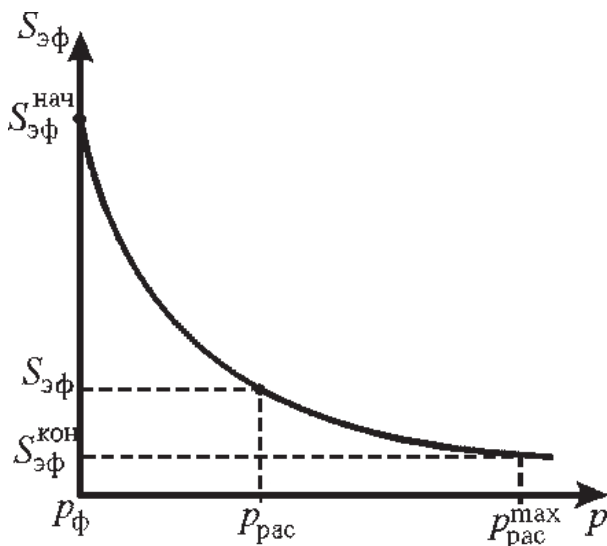


Рис. 6.9. Зависимость эффективной скорости откачки от давления

6.6.1. Схема расчета расхода теплоносителя в криогенном насосе-разделителе смеси

Исходные данные:

- поток газа (аргона) $Q_{\text{Ar}} = 73,8$ моль/час;
- диаметр канала по которому циркулирует теплоноситель $d_{\text{к}} = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м;

- осредненная по времени и поверхности температура криопанели $\bar{T}_{\text{кп}} = 30 \text{ K}$;
- температура откачиваемого газа $T = 300 \text{ K}$;
- теплоотдача от стенок канала к теплоносителю $\alpha = 250 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$;
- температура теплоносителя (He) на входе в криопанель $T_{\text{вх}} = 20 \text{ K}$, давление $p = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Расход конденсируемого газа (аргона):

$$G_{\text{Ar}} = Q_{\text{Ar}}^{\text{H}} / \Delta T_{\text{Ar}} = \frac{73,8 \cdot 0,040}{3600} = 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с.}$$

Теплота, выделяющаяся при кристаллизации аргона:

$$Q_{\text{Ar}} = L_{\text{Ar}}^* G_{\text{Ar}},$$

где L_{Ar}^* – теплота кристаллизации. В случае кристаллизации смеси газов: $Q_{\text{см}} = \sum L_j^* G_j$.

Эта теплота передается теплоносителю (гелию):

$$L_{\text{Ar}}^* G_{\text{Ar}} = C_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) G_{\text{He}},$$

где C_p – удельная теплоемкость гелия при актуальных давлении и температуре ($p = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_{\text{сп}} = 23,4 \text{ K}$), $T_{\text{вых}}$, $T_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на выходе и входе соответственно. Отсюда следует, что расход теплоносителя можно рассчитать по следующей формуле:

$$G_{\text{He}} = \frac{L_{\text{Ar}}^* G_{\text{Ar}}}{C_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})}. \quad (6.2)$$

Передача теплоты, выделившейся при кристаллизации аргона, к потоку гелия осуществляется путем конвективного теплообмена $Q_{\text{Ar}} = \alpha \Delta T_c S$, где α – коэффициент теплоотдачи, ΔT_c – температурный напор на поверхности теплообмена, $\Delta T_c = \bar{T}_{\text{кп}} - \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}$, S – площадь поверхности теплообмена $S = \pi d_k l$, d_k – диаметр канала, по которому циркулирует теплоноситель, принимаем в первом приближении $d_k = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; l – длина канала.

Тогда, принимая во внимание уточнения для уравнения теплообмена, можно записать

$$Q_{\text{Ar}} = \alpha \Delta T_c S = \alpha \left(\bar{T}_{\text{кп}} - \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2} \right) S. \quad (6.3)$$

В первом приближении итерационного расчета принимаем, что $S = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, $l = 1,32 \text{ м}$.

Теплота, выделяющаяся при кристаллизации аргона:

$$Q_{\text{Ar}} = L_{\text{Ar}}^* G_{\text{Ar}} = 2,02 \cdot 10^5 \cdot 8,2 \cdot 10^{-4} = 164 \text{ Вт}.$$

Согласно предварительной оценке, для данных условий можно принять коэффициент теплоотдачи равным $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Средняя температура криопанели принимается равной $\bar{T}_{\text{кп}} = 30 \text{ К}$, а температура гелия на входе в крионасос – $T_{\text{вх}} = 20 \text{ К}$. Тогда температура гелия на выходе из криогенного насоса в соответствии с (6.3) определяется по формуле:

$$T_{\text{вых}} = 2 \left(\bar{T}_{\text{кп}} - \frac{Q_{\text{Ar}}}{\alpha S} \right) - T_{\text{вх}}.$$

Из расчета по которой получаем значение температуры гелия на выходе из криогенного насоса

$$T_{\text{вых}} = 2 \left(30 - \frac{164}{250 \cdot 7,5 \cdot 10^{-2}} \right) - 20 = 22,6 \text{ К}.$$

Расход гелия рассчитывается по (1)

$$G_{\text{He}} = \frac{2,02 \cdot 10^5 \cdot 8,2 \cdot 10^{-4}}{5,40 \cdot 10^3 \cdot (22,6 - 20,0)} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}.$$

Затем находится скорость циркуляции гелия: $w = \frac{G_{\text{He}}}{\rho_{\text{He}} S_{\text{поп}}}$,

где $S_{\text{поп}}$ – площадь поперечного сечения канала, $S_{\text{поп}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4}$,

тогда

$$w = \frac{1,17 \cdot 10^{-3}}{7,86 \cdot 0,785 \cdot (1,2 \cdot 10^{-2})^2} = 1,31 \text{ м/с}.$$

В расчетах криоразделительного насоса в качестве температуры отнесения принимается средняя температура теплоносителя (гелия)

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{вых}} + T_{\text{вх}}}{2} = \frac{22,6 + 20}{2} = 21,3 \text{ К.}$$

$$\text{Re} = \frac{wd_{\text{к}}}{\nu} = \frac{1,31 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}}{3,1 \cdot 10^{-7}} = 5,07 \cdot 10^4.$$

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4},$$

$$\text{Nu} = 0,023(5,07 \cdot 10^4)^{0,8} 0,945^{0,4} \approx 133.$$

$$\text{С учетом того, что } \text{Nu} = \frac{\alpha d_{\text{к}}}{\lambda_{\text{He}}}, \text{ получим } \alpha = \frac{133 \cdot 0,02}{0,012} \approx 221 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Принятое в первом приближении значение теплоотдачи с учетом точности определения значений теплофизических свойств, схематичности исходных посылок расчета можно считать вполне удовлетворительным. Рассчитанное значение коэффициента теплоотдачи меньше принятого в исходных данных расчета, поскольку допускается рост расхода холодного гелия как теплоносителя.

6.6.3. Расчет проводимости вакуумных каналов термоядерного реактора

Каждая из восьми вакуумных станций ИТЭР соединена с реактором двумя каналами диаметром $d_1 = 2,0$ м каждый и длиной $l_1 = 12,0$ м. Эти радиальные каналы объединены поперечным каналом длиной $l_2 = 3,5$ м, с диаметром $d_2 = 1,25$ м. На поперечном канале установлены три КВН.

Расчет проводимости вакуумных каналов производится по гелию, как газу с наименьшей удельной быстротой откачки. В соответствии со схемой (рис. 6.10) проводимость каналов одной станции определяется по формуле:

$$\frac{1}{U_{\Sigma}} = \frac{1}{2U_1} + \frac{1}{U_2}.$$

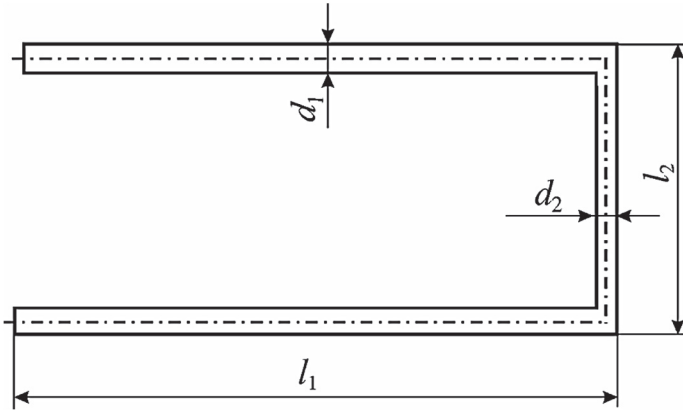


Рис. 6.10. Принципиальная схема вакуумных трубопроводов, соединяющих вакуумную станцию с реактором

Режим течения потока определяется числом $Kn = \frac{\langle l \rangle}{l}$,

$$\text{где } \langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_0^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d_0^2 p},$$

$$\text{откуда } \langle l \rangle = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 5,2 \text{ м.}$$

Значение $Kn = 2,6 > 1,5$, следовательно, в рассматриваемом случае имеет место молекулярный режим течения.

Полагаем, что каналы можно рассматривать как длинные, тогда можно использовать формулу

$$U = \frac{1}{3} v_{\text{ср.кв}} S \frac{d_r}{l}.$$

Для гелия при $T = 300 \text{ К}$:

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 8,314 \cdot 300}{0,004}} = 1367 \text{ м/с,}$$

$$U_1 = \frac{1}{3} 1367 \cdot 0,785 \cdot \frac{2^3}{12} = 238 \text{ м}^3/\text{с,}$$

$$U_2 = \frac{1}{3} 1367 \cdot 0,785 \cdot \frac{1,25^3}{3,5} = 205 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Тогда проводимость каналов одной вакуумной станции равна $U = 143 \text{ м}^3/\text{с}$.

6.6.4. Расчет продолжительности рабочего режима криовакуумного насоса для откачки дейтерия и трития

Вторая ступень КВН

Исходные данные: откачиваемый газ – дейтерий;
 максимальная толщина криоосадка – $\delta_{\text{кк}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м;
 поток дейтерия – $Q_{D_2} = 72$ моль/час;
 плотность криослоя – $\rho_{\text{кк}} = 200$ кг/м³.

Поток атомов дейтерия:

$$Q_{D_2}^* = \frac{Q_{D_2}}{\tau_p} N_A = \frac{72}{3600} 6,02 \cdot 10^{23} = 1,20 \cdot 10^{22} \text{ с}^{-1}.$$

Согласно определению поток дейтерия определяется соотношением:

$$Q_{D_2} = p \frac{dV}{dt} = nkT \frac{dV}{dt} = kT \frac{dN}{dt} = kT Q_{D_2}^*, \text{ Па} \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

$$Q_{D_2} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1,20 \cdot 10^{22} = 49,8 \text{ Па} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Из анализа размерности следует, что расход дейтерия определяется по уравнению:

$$G_{D_2} = Q_{D_2}^* \mu = \frac{72}{3600} 0,002 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}.$$

Для криослоя дейтерия толщиной δ , на криопанели площадью S можно записать уравнение материального баланса:

$$\varepsilon \rho_{\text{кк}} \delta_{\text{кк}} S_{\text{кп}} = G_{D_2} \tau, \text{ откуда } \tau = \frac{\varepsilon \rho_{\text{кк}} \delta_{\text{кк}} S_{\text{кп}}}{G_{D_2}},$$

где ε – пористость криослоя. Принимаем $\varepsilon = 0,4$, $S = 1 \text{ м}^2$, температуру дейтерия после прохождения 1-й ступени $T_{\text{H2}} = 80 \text{ К}$.

$$\tau = \frac{0,4 \cdot 200 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{4 \cdot 10^{-5}} = 4 \cdot 10^3 \text{ с}.$$

Третья ступень КВН

Исходные данные: откачиваемый газ – гелий;
 максимальная толщина криоосадка – $\delta_{\text{кк}} = 6 \cdot 10^{-3}$ м;

поток гелия – $Q_{\text{He}} = 2,475$ моль/час;

плотность криослоя – $\rho_{\text{кc}} = 400$ кг/м³.

Поток атомов дейтерия:

$$Q_{\text{He}}^* = \frac{Q_{\text{He}}}{\tau_p} N_A = \frac{2,475}{3600} 6,02 \cdot 10^{23} = 4,2 \cdot 10^{20} \text{ с}^{-1}.$$

Согласно определению поток гелия определяется соотношением:

$$Q_{\text{He}} = p \frac{dV}{dt} = nkT \frac{dV}{dt} = kT \frac{dN}{dt} = kT Q_{\text{He}}^*, \text{ Па} \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

$$Q_{\text{He}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 80 \cdot 4,2 \cdot 10^{20} = 0,464 \text{ Па} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Из анализа размерности следует, что расход дейтерия определяется по уравнению:

$$G_{D_2} = Q_{\text{He}}^{**} \mu = \frac{2,475}{3600} 0,004 = 2,78 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}.$$

Для криослоя дейтерия толщиной δ , на криопанели площадью S можно записать уравнение материального баланса:

$$\varepsilon \rho_{\text{кc}} \delta_{\text{кc}} S_{\text{кп}} = G_{D_2} \tau, \text{ откуда } \tau = \frac{\varepsilon \rho_{\text{кc}} \delta_{\text{кc}} S_{\text{кп}}}{G_{D_2}},$$

где ε – пористость криослоя.

Принимаем значение пористости равным $\varepsilon = 0,4$, площадь криопанели – $S = 1$ м², а температуру гелия после прохождения двух ступеней $T_{\text{He}} = 80$ К.

$$\tau = \frac{0,4 \cdot 400 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{2,78 \cdot 10^{-6}} \approx 5,76 \cdot 10^4 \text{ с}.$$

Контрольные вопросы и задания.

1. Назовите параметры вакуумных систем термоядерных установок разных поколений.

2. Перечислите этапы работы вакуумных систем термоядерных установок.

3. Опишите механизмы потерь энергии плазмы.
4. В чем заключается суть диверторной откачки?
5. Назовите основные параметры экспериментальных термоядерных установок (ЭТУ) и реакторов.
6. Что входит в понятие первой стенки?
7. Какие средства вакуумной откачки можно применять в ЭТУ и реакторах?
8. Назовите особенности вакуумных систем термоядерных установок с первой стенкой с совмещенными и отдельными функциями.
9. Опишите варианты компоновки модуля откачки разрядной камеры.
10. Назовите режимы работы вакуумных систем термоядерных установок.
11. Приведите структуру основных элементов вакуумных систем термоядерных установок.
12. Опишите структуру и состав вакуумной системы инжектора быстрых нейтральных атомов.
13. Опишите структуру разрядной камеры Т-15.
14. Назовите примерный состав вакуумной системы Т-15.
15. Каковы основные параметры вакуумной системы ИТЭР?
16. Приведите примерную схему вакуумной системы ИТЭР.
17. Какова принципиальная схема криовакуумного насоса ИТЭР?
18. В каких режимах работы вакуумных систем термоядерных установок используются турбомолекулярные насосы?
19. В каких режимах работы вакуумных систем термоядерных установок используются криосорбционные насосы?
20. Какова схема размещения криовакуумного насоса ИТЭР?
21. Опишите механизмы откачки в криовакуумном насосе ИТЭР.
22. Чем вызвана цикличность работы криовакуумных насосов в ИТЭРе?
23. Какова периодичность частичной и полной регенерации криовакуумных насосов?
24. В чем заключается механизм откачки гелия в криовакуумном насосе?

25. В каком устройстве и каким образом из смеси откачиваемых газов выделяется аргон?
26. Какие теплоносители и в каком агрегатном состоянии используются в криовакуумном насосе?
27. Приведите принципиальную схему криоразделительного насоса ИТЭР.
28. Приведите схему сепарации аргона.
29. Приведите схему теплового расчета криовакуумного насоса.
30. Приведите схему теплового расчета криоразделительного насоса.

Список рекомендуемой литературы

1. Дэшман, С. Научные основы вакуумной техники / С. Дэшман. – М.: Мир, 1964.
- 2 Уэстон, Дж. Техника сверхвысокого вакуума / Дж. Уэстон. – М.: Мир, 1988.
3. Хефер, Р. Криовакуумная техника / Р. Хефер – М.: Энергоатомиздат, 1983.

ГЛАВА 7. СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА (СМС)

7.1. Структура и состав СМС

Магнитная система ИТЭР (рис. 7.1) состоит из 48 элементов: 18 катушек создающих тороидальное магнитное поле (ТП) и 6 катушек полоидального магнитного поля (ПП), а также центрального соленоида, состоящего из 6 секций, и 18 корректирующих катушек.

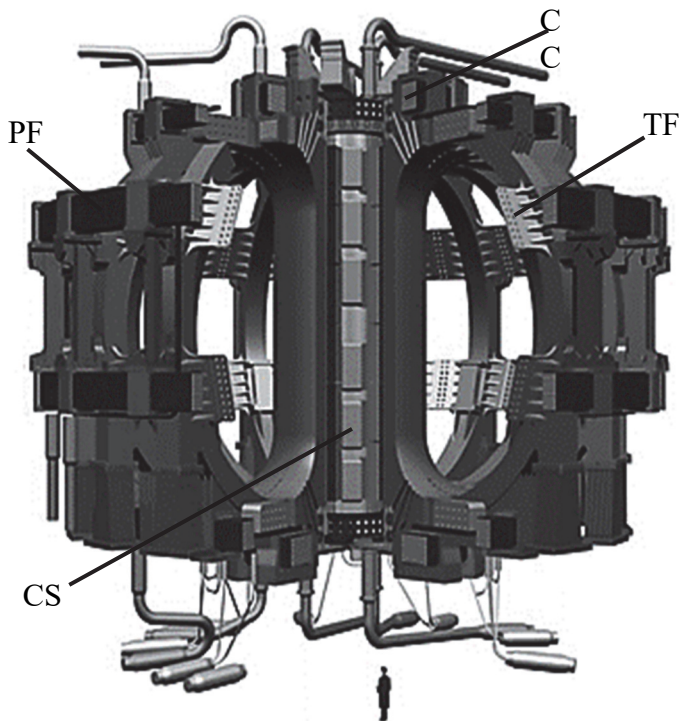


Рис. 7.1. Структура и состав СМС ИТЭР:

TF – катушки тороидального магнитного поля (ТП);
CS – модули центрального соленоида; PF – катушки полоидального поля (ПП);
CC-корректирующие катушки

Магнитная система ИТЭР является самой мощной на сегодняшний день сверхпроводящей магнитной системой, запасенная энергия 51 ГДж. В ее состав входит около 200 километров сверхпроводящих кабелей, общей массой 2800 тонн.

Для создания необходимого магнитного поля используются сверхпроводящие магниты, изготовленные из токонесущих элементов типа «кабель в оболочке». Использование сверхпроводников позволяет избежать огромных энергетических потерь, одновременно создавая магнитные поля с рекордными значениями магнитной индукции.

Индукция поля, создаваемого магнитной системой, достигает 13 Тл на обмотках. Это чрезвычайно высокое значение. Для сравнения: это поле превосходит магнитное поле Земли в 200 000 раз.

Катушки тороидального поля (*toroidal field* – TF) расположены снаружи вакуумной камеры токамака и внутри оболочки криостата. Они состоят из 18 идентичных элементов (D-образных катушек), расположенных вертикально вокруг торообразной вакуумной камеры. Они создают магнитное поле в центре камеры токамака напряженностью 5,3 Тл и запасают энергию 41 ГДж. Каждая катушка весит около 300 тонн, имеет высоту 15 метров и ширину 9 метров.

Общий вес катушек тороидального поля 5400 тонн. Катушки намотаны из сверхпроводящего кабеля, который состоит из прядей (стрендов), заключенных в оболочку из того же сплава. Материал сверхпроводника – ниобий-оловянный сплав (Nb_3Sn). Катушки TF помещаются в корпус, который охватывает пакет обмоток и является основным конструктивным компонентом магнитной системы.

Кроме прядей внутри кабеля проходят каналы для циркуляции охладителя – жидкого гелия. Общая длина прядей, используемых для катушек TF, составляет более 80 тысяч метров. Для ремонта изготовлена одна запасная катушка.

Шесть катушек полоидального поля (*poloidal field* – PF) расположены горизонтально поверх катушек TF. Они находятся

внутри криостата. Благодаря своим размерам четыре из шести катушек PF (2, 3, 4, и 5) наматываются непосредственно на территории ИТЭР в специально построенном для этого здании пологидальных катушек. Две самые большие катушки PF-3 и PF-4 имеют внешний диаметр 24 метра, а масса каждой 400 тонн. Меньшие катушки (обозначения в спецификации ITER PF-1 и PF-6) изготавливают России (PF-1 изготовлена в Санкт-Петербурге на Средне-Невском судостроительном заводе) и Китае (PF-6), и доставлены на площадку ИТЭР из стран-производителей.

Центральный соленоид (*central solenoid* – CS) расположен в центре тороида – вдоль оси вакуумной камеры. По сути, он представляет собой первичную обмотку трансформатора, возбуждающего индуктивный ток в плазме, плазменный тороидальный разряд является вторичной обмоткой такого трансформатора. Длительность генерации тока в плазме обусловлена трансформаторной схемой и определяется диаметром внутреннего отверстия тороида.

Длительность стандартных разрядов ИТЭР составляет 300÷500 секунд. Генерируемый индуктором ток в плазме нагревает ее за счет омического сопротивления.

Центральный соленоид состоит из шести катушек, намотанных из специального кабеля из ниобий-оловянного сплава (Nb_3Sn). Этот кабель рассчитан на ток до 46 кА. Кабель проектировался, чтобы выдержать без деформации значительный вес вышележащих слоев. Каждая катушка похожа на стопку блинов. Стеклополиамидная изоляция, пропитанная эпоксидной смолой, способна выдержать напряжение до 29 кВ. Длина кабеля, укладываемого в каждую катушку, составляет 910 метров. За 20 лет эксплуатации токамака центральный соленоид сформирует примерно 60000 импульсов.

Корректирующие катушки расположены внутри вакуумной камеры между стенкой камеры и бланкетом. Они служат для управления ЭЛМами.

Характеристики основных магнитных катушек приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Характеристики основных магнитных катушек

Тип катушки	Материал проводника	Длина проводника, 10 ³ ·м	Масса, т	Номинальный ток, кА	Магнитное поле, Тл	Накопленная энергия, ГДж	Стоимость (прогноз на 2011 г.), М€
Полоидальные катушки (PF)	NbTi	65	2163	52	6	4	122
Тороидальные катушки (TF)	Nb ³ Sn	88	6540	68	11,8	41	323
Центральный соленоид (CS)	Nb ³ Sn	42	974	46	13	6.4	135

7.2. Конструкция сверхпроводящих кабелей и шин

Новые стандартные блоки, из которых строится магнитная система реактора ITER, отличаются высокой эффективностью за счет использования технологии внутреннего охлаждения кабеля CICC (cable-in-conduit), которые представляют собой сложный пакет из сверхпроводящего материала и медных проводников, заключенный в оболочку из нержавеющей стали. Для создания магнитной системы потребовалось 200 километров такого кабеля.

Россия является поставщиком сверхпроводящих токонесущих элементов для обмоток тороидального и полоидального полей. Российские обязательства включают:

- 28 единиц токонесущих элементов для катушек ТП на основе Nb₃Sn сверхпроводников;

- 41 единицу токонесущего элемента для катушек ПП на основе Nb-Ti сверхпроводников (в сотрудничестве с ЕС РФ производит сверхпроводник и кабели для всех токонесущих элементов, а ЕС осуществляет их затягивание в оболочку).

На рисунках 7.2 и 7.3 представлены поперечные сечения сверхпроводящих проводников для катушек тороидального и полоидального магнитных полей.

На рисунках 7.4 и 7.5 – поперечное сечение токонесущих элементов, собранных из соответствующих сверхпроводящих проводников.

На рисунке 7.6 представлен общий вид катушки полоидального магнитного поля.

На боковой поверхности катушки показаны элементы соединения отдельных секторов катушки между собой.

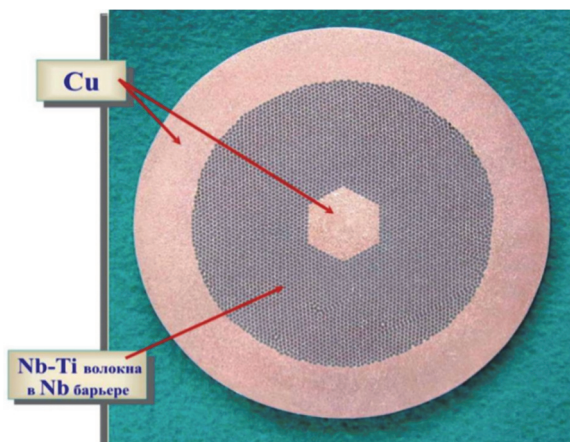


Рис. 7.2. Поперечное сечение сверхпроводника для катушек полоидального поля ИТЭР на основе NbTi: диаметр сверхпроводника $0,730 \pm 0,005$ мм; длина единичного куска не менее 1000 м; количество волокон – 4488; критический ток > 306 А

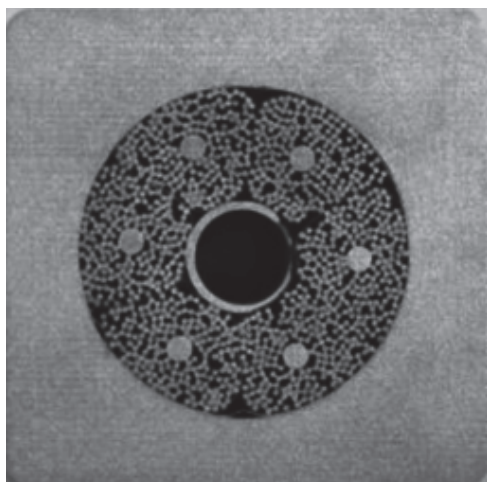


Рис. 7.3. Токонесущий элемент катушек ПП (55 мм)

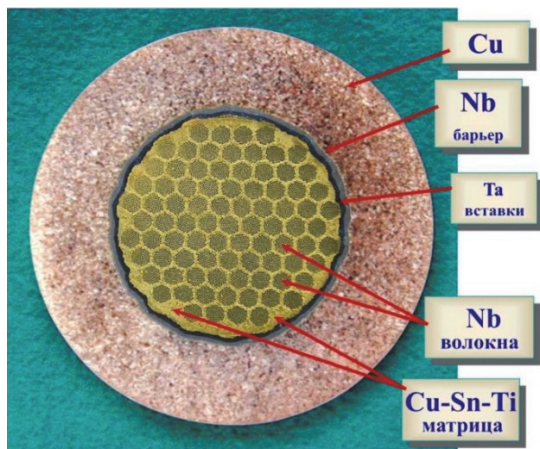
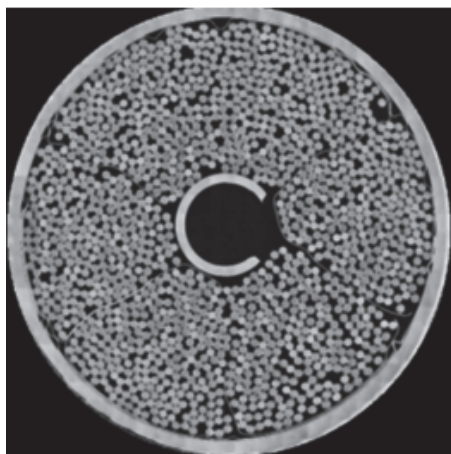


Рис. 7.4. Сверхпроводящий кабель
для катушек тороидального поля ИТЭР на основе Nb_3Sn :
диаметр сверхпроводника $0,820 \pm 0,005$ мм; длина единичного куска не менее 1000 м;
количество двоянных волокон – 9540; критический ток >190 А

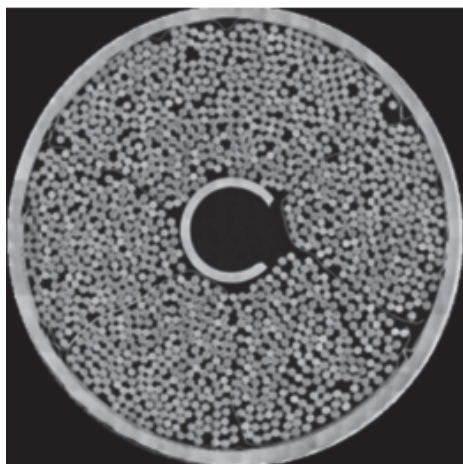


Рис. 7.5. Шина токонесущего элемента катушек ТП (диаметр 43.7 мм)

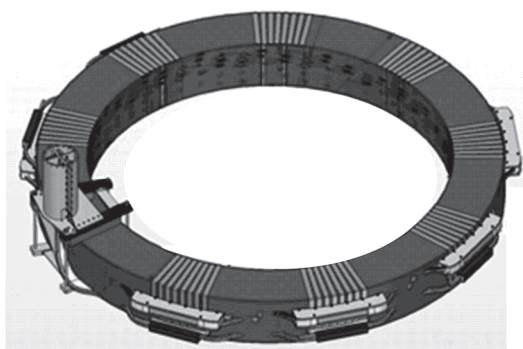


Рис. 7.6. Общий вид катушки ПФ-1 полоидального магнитного поля
с внешним диаметром 9 м
и поперечным квадратным сечением со стороной 1 м

7.3. Вклад РФ в создание СМС ИТЭР

Единственное в современной России промышленное производство (до 60 тонн в год) низкотемпературных сверхпроводящих материалов на основе соединения Nb_3Sn и сплава $NbTi$ основано на ОАО «Чепецкий механический завод» (ОАО «ЧМЗ», входит в контур ОАО «ТВЭЛ»), г. Глазов, Удмуртская республика. Технология изготовления разработана ОАО «ВНИИНМ».

Переоснащены мощности кабельного производства ОАО «ВНИИКП» (г. Подольск), которые после модернизации позволяют производить более 10 000 метров сверхпроводящего кабеля в год.

ОАО «ВНИИКП» на территории Института физики высоких энергий (ИФВЭ) создана линия «джекетирования», позволяющая выпускать до 7 км готового сверхпроводящего токнесущего элемента в год.

Восстановлена установка для проведения вакуумных и гидравлических испытаний сверхпроводящих токнесущих элементов в НИЦ «Курчатовский институт».

Производство сверхпроводящих материалов

Технология производства сверхпроводящих материалов была разработана ОАО «ВНИИНМ» (институт им. А.А. Бочвара), который также осуществляет технологический надзор в течение всего выпуска для ИТЭР.

В цикл производства входит получение (плавка) первичных материалов (Nb , $NbTi$), механическая деформация композиционного сверхпроводника и его элементов (прессование, волочение, промежуточные термообработки), а также приемочные испытания в криогенной лаборатории для испытания сверхпроводников при температуре жидкого гелия 4,2 К ($-268,8^{\circ}C$).

Криогенная лаборатория ОАО «ВНИИНМ» была сертифицирована Международной организации в качестве официальной поверочной лаборатории свойств сверхпроводников.

Всего, с момента запуска производства в 2009 году, должно быть выпущено ~99 тонн Nb_3Sn и ~125 тонн $NbTi$ сверхпроводника для ИТЭР.

7.4. Расчет времени охлаждения катушки СМС

Катушка СМС представляет собой сложную композитную структуру: сверхпроводящие шины укладываются в D-образный кожух, изготовленный из нержавеющей стали. Шины пропитываются электроизоляционным составом. Поскольку по шинам протекает ток МА и на него действуют амперова сила 10^8 Н, необходимо эту сложную конструкцию преобразовать в монолитную, для чего кожух вместе с шинами заливается эпоксидной смолой.

Примеры расчетов СМС

С целью упрощения расчетной схемы оценочных расчетов сверхпроводящую катушку представляем в виде сочетания сверхпроводящего проводника, который охватывает медная оболочка. В этом случае теплоемкость сверхпроводящей шины можно представить в следующем виде:

$$C_{\text{р.св.пр}} = \alpha C_{\text{р.м}} + \beta C_{\text{р.св.пр}},$$

где α и β – коэффициенты, учитывающие весовую долю меди и сверхпроводящего материала в данной конструкции.

В качестве исходной конструкции катушек СМС используется катушка тороидального магнитного поля: материал оболочки шины – медь, а сверхпроводника – Nb_3Sn , $T_{\text{нач}} = 300$ К, $T_{\text{кон}} = 4$ К – начальная и конечная температура катушек соответственно.

Отводимый от катушек СМС тепловой поток в заданном диапазоне температур: $Q = C_p m (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}})$, который передается теплоносителю:

$$Q = \alpha \Delta T_{\text{к-тн}} F \tau = \alpha (\bar{T}_{\text{к}} - \bar{T}_{\text{тн}}) F \tau,$$

где \bar{C}_p – удельная теплоемкость катушек СМС при температуре отнесения $\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{нач}} + T_{\text{кон}}}{2}$; m – масса катушек СМС; α – коэффициент теплоотдачи; $\bar{T}_{\text{кат}}$ – средняя температура стенки катушки СМС; $\bar{T}_{\text{тн}}$ – средняя температура теплоносителя; F – поверхность теплообмена, τ – время охлаждения.

В соответствии с тепловым балансом можно записать следующее равенство $C_p m (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}) = \alpha (T_{\text{кат}} - \bar{T}_{\text{ти}}) F \tau$, откуда для времени охлаждения катушек в заданном диапазоне температур получаем

$$\tau = \frac{m C_p (\bar{T}_{\text{кат}}) (T_{\text{кат.кон}} - T_{\text{кат.нач}})}{\frac{a}{1+a} \alpha F \bar{T}_{\text{кат}}} \quad (7.1)$$

Расчеты таких структур выполняются численными методами. Для оценочных расчетов приходится делать разумные допущения, упрощения структуры.

В наших расчетах принимаем во внимание, что сверхпроводящая шина из Nb_3Sn заключена в медную матрицу. При этом в целях упрощения расчетов наличие электроизоляционной пропитки, проволоки из нержавеющей стали, заливки эпоксидной смолой не учитывается. Тогда для упрощенной структуры сверхпроводящего кабеля удельную теплоемкость катушки можно рассчитывать по следующей формуле:

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{p.m} \tilde{m}_m + \bar{C}_{p.\text{св.пр}} \tilde{m}_{\text{св.пр}},$$

где осреднение выполняется по рассматриваемому диапазону температур, а $\tilde{m}_m, \tilde{m}_{\text{св.пр}}, \bar{C}_{p.m}, \bar{C}_{p.\text{св.пр}}$ – массовая доля, удельная теплоемкость меди и сверхпроводящего материала соответственно.

Исходя из оценок реальной катушки СМС ИТЭР принимается, что $\tilde{m}_m = 0,7$, а $\tilde{m}_{\text{св.пр}} = 0,3$, получим

$$\bar{C}_p = 0,7 \bar{C}_{p.m} + 0,3 \bar{C}_{p.\text{св.пр}}.$$

При выполнении расчетов, следует помнить о весьма сильной зависимости теплоемкости материалов от температуры в криогенной области температур. Поэтому расчеты теплоемкости при охлаждении

(нагреве) следует выполнять по формуле $\bar{C}_p = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT}{T_2 - T_1}$.

В оценочных расчетах допускается использование линейной интерполяции. При этом, чем шире рассматриваемый диапазон температур и чем сильнее зависимость теплоемкости от температуры, тем выше погрешность таких расчетов.

В общем случае теплоемкость является функцией температуры. Если на некотором участке (рис. 7.7) выполнить линейризацию зависимости $C_p(T)$, то можно записать, что $\operatorname{tg}\alpha = \frac{C_{p,2} - C_{p,1}}{T_2 - T_1}$.

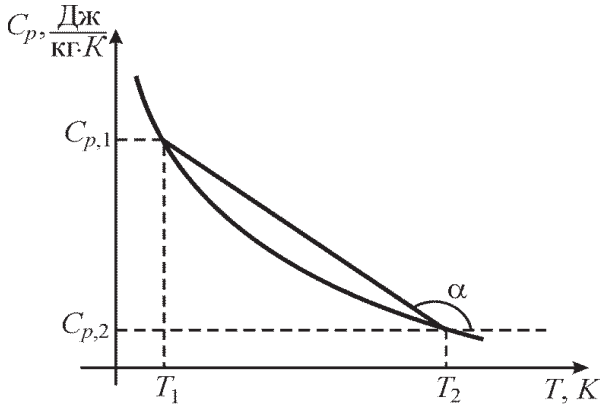


Рис. 7.7. Линейризация зависимости $C_p(T)$

Для изменения температуры объекта на dT необходимо подвести (отвести) теплоту $dQ = mC_p(T)dT$, где $C_p(T)$ – удельная теплоемкость охлаждаемого объекта при температуре T и равна $C_p(T) = C_{p,1}(T_1)(1 + kT)$, где $k = \operatorname{tg}\alpha$. При конечном изменении температуры

$$Q = \int_1^2 dQ = \int_{T_1}^{T_2} mC_p(T)dT,$$

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mC_{p,1}(T_1)(1 + kT)dT = mC_{p,1}(T_1) \int_{T_1}^{T_2} (1 + kT)dT =$$

$$= mC_{p,1}(T_1) \left[(T_2 - T_1) + \frac{k}{2}(T_2^2 - T_1^2) \right], \text{ т.е.}$$

$$Q = mC_{p,1}(T_1) \left[(T_2 - T_1) + \frac{k}{2}(T_2^2 - T_1^2) \right].$$

В случае степенной аппроксимации зависимости удельной теплоемкости от температуры вида $C_p(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d$ по экспериментальным данным, приведенным в справочной литературе, получены следующие аппроксимационные соотношения для зависимости удельной теплоемкости от температуры:

– медь $C_p = 2 \cdot 10^{-5} T^3 - 0,0164T^2 + 4,7847T - 91,486$;

– нержавеющая сталь, X18H10T

$$C_p = 3 \cdot 10^{-5} T^3 - 0,0204T^2 + 5,9843T - 163,66$$

– сверхпроводник, Nb₃Sn

$$C_p = 2 \cdot 10^{-5} T^3 - 0,0125T^2 + 3,2102T - 48,027.$$

Примечание: очевидно, что в приведенных аппроксимационных соотношениях числовые коэффициенты являются размерными, например, для меди $a = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^4}$.

Расчет подводимого (отводимого) теплового потока рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} Q &= \int_{T_1}^{T_2} m C_p(T) dT = \int_{T_1}^{T_2} m (aT^3 + bT^2 + cT + d) dT = \\ &= m \left[\frac{a}{4} T^4 \Big|_{T_1}^{T_2} + \frac{b}{3} T^3 \Big|_{T_1}^{T_2} + \frac{c}{2} T^2 \Big|_{T_1}^{T_2} + dT \Big|_{T_1}^{T_2} \right] = \\ &= m \left[\frac{a}{4} (T_2^4 - T_1^4) + \frac{b}{3} (T_2^3 - T_1^3) + \frac{c}{2} (T_2^2 - T_1^2) + d(T_2 - T_1) \right]. \end{aligned}$$

Расчет времени охлаждения катушки СМС

Исходные данные:

– длина сверхпроводящей шины $l = 1000$ м;

– диаметр канала для прокачки теплоносителя $d_k = 2$ мм;

– масса катушки СМС $m_{\text{кат}} = \frac{m_{\Sigma}}{18} = \frac{3 \cdot 10^5}{18} = 1,67 \cdot 10^4$ кг;

– принимается следующая связь температурного напора в произвольном сечении катушки $\Delta \bar{T}_{\text{кат-тн}}$ с температурой теплоносителя в этом сечении $T_{\text{тн}}$:

$$\Delta T_{\text{кат-тн}} = T_{\text{кат}} - T_{\text{тн}} = aT_{\text{тн}}, \text{ где } a = 0,01 \div 0,03;$$

– охлаждение катушек обеспечивается гелием при давлении $p = 1,91 \cdot 10^6$ Па;

– значение теплоотдачи от стенки катушки к гелию в газообразном состоянии принимается равным $\alpha = 250$ Вт/(м² · К), а при охлаждении жидким гелием при температуре катушки ниже 20 К – $\alpha = 1000$ Вт/(м² · К).

Поверхность теплообмена равна

$$F_k = \pi d_k l = 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 6,28 \text{ м}^2.$$

В расчете времени охлаждения предлагается весь заданный интервал температур разделить три диапазона: $\Delta T_1 = 300 \div 80$ К, $\Delta T_2 = 80 \div 20$ К, $\Delta T_3 = 20 \div 4$ К.

В первом приближении оценки времени охлаждения значения теплоемкости в рассматриваемом диапазоне температур определяются расчетом по аппроксимационным соотношениям при соответствующей средней температуре:

1) $T = 300 \div 80$ К:

$$\bar{T} = \frac{300 + 80}{2} = 190 \text{ К}, \quad \bar{C}_{p,\text{св.пр}} = 225 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \bar{C}_{p,\text{м}} = 355 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\bar{C}_p = 355 \cdot 0,7 + 225 \cdot 0,3 = 316 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

2) $T = 80 \div 20$ К:

$$\bar{C}_{p,\text{м}} = 100,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \bar{C}_{p,\text{св.пр}} = 80,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\bar{C}_p = 100,6 \cdot 0,7 + 80,3 \cdot 0,3 = 94,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

3) $T = 20 \div 4$ К:

$$\bar{C}_{p,\text{м}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \bar{C}_{p,\text{св.пр}} = 6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \bar{C}_p = 1 \cdot 0,7 + 6 \cdot 0,3 = 2,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

В соответствии с исходными условиями расчета для температуры катушки в произвольном сечении можно записать выражение:

$$T_{\text{кат}} = T_{\text{тн}} + \Delta T_{\text{кат-тн}} = (1 + a) T_{\text{тн}}.$$

Поперечное сечение катушки СМС представляет сложную композитную структуру. Поэтому во избежание недопустимого перепада температур и, как следствие этого, возникновения термических напряжений недопустимо высокого уровня, в расчетах времени охлаждения катушек принимается значение $a = 0,01$.

Если в рассматриваемом диапазоне температур представляется возможным полагать коэффициент теплоотдачи постоянным, тогда для времени охлаждения катушки СМС, исходя из уравнения (7.1), можно получить следующее выражение:

$$\tau = \frac{Q_{\text{кат}}}{Q_{\text{тн}}^*} = \frac{\int_{T_{\text{нач}}}^{T_{\text{кон}}} mC_p(T_{\text{кат}})dT_{\text{кат}}}{\alpha F(\bar{T}_{\text{кат}} - \bar{T}_{\text{тн}})},$$

где $Q_{\text{тн}}^*$ – тепловой поток, отводимый от катушки в 1 с.

С учетом того, что $\bar{T}_{\text{тн}} = \frac{\bar{T}_{\text{кат}}}{1+a}$ получаем

$$\tau = \frac{Q_{\text{кат}}}{Q_{\text{тн}}} = \frac{\int_{T_{\text{нач}}}^{T_{\text{кон}}} mC_p(T_{\text{кат}})dT_{\text{кат}}}{\frac{a}{1+a} \alpha F \bar{T}_{\text{кат}}}.$$

Если использовать понятие среднетемпературной удельной теплоемкости в рассматриваемом диапазоне температур, можно получить расчетное соотношение для времени охлаждения:

$$\tau = \frac{mC_p(T_{\text{кат}})(T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}})}{\frac{a}{1+a} \alpha F \bar{T}_{\text{кат}}}. \quad (7.2)$$

Расчеты по уравнению (7.2) дают следующие значения

1) $T = 300 \div 80 \text{ К}$:

$$\tau_1 = \frac{1,67 \cdot 10^4 \cdot 316 \cdot 220}{250 \cdot 6,28 \cdot \frac{0,01}{1,01} \cdot 190} = 4,45 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

2) $T = 80 \div 20$ К:

$$\tau_2 = \frac{1,67 \cdot 10^4 \cdot 94,5 \cdot 60}{250 \cdot 6,28 \cdot \frac{0,01}{1,01} \cdot 50} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

3) $T = 20 \div 4$ К:

$$\tau_3 = \frac{1,67 \cdot 10^4 \cdot 2,5 \cdot 16}{1000 \cdot 6,28 \cdot 12 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 0,89 \cdot 10^3 \text{ с.}$$

Общее время охлаждения равно $\tau_{\Sigma} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 5,74 \cdot 10^5$ с.

Расчет времени охлаждения кожуха катушки

Исходные данные:

- длина канала для теплообмена $l = 500$ м;
- диаметр канала для прокачки теплоносителя $d_k = 4$ мм;
- масса кожуха одной катушки

$$m_{\text{кож}} = \frac{m_{\Sigma}}{18} = \frac{3,3 \cdot 10^5}{18} = 1,83 \cdot 10^4 \text{ кг;}$$

- материал кожуха – нержавеющая сталь 1Х18Н10Т;
- осредненный по поверхности теплообмена и температуре катушки температурный напор на стенке $\Delta T_c = T_c - T_{\text{н}} = 2$ К;
- охлаждение кожуха обеспечивается гелием при давлении $p = 1,91 \cdot 10^6$ Па;
- среднее значение теплоотдачи принимается равным $\alpha = 250$ Вт/(м² · К).

Поверхность теплообмена равна

$$F_k = \pi d_k l = 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 6,28 \text{ м}^2, \text{ тогда}$$

1) $T = 300 \div 80$ К:

$$\bar{T} = \frac{300 + 80}{2} = 190 \text{ К}, \quad \bar{C}_p = 410 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\tau_1 = \frac{1,83 \cdot 10^4 \cdot 410 \cdot 220}{250 \cdot 6,28 \cdot 190 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 5,54 \cdot 10^5 \text{ с;}$$

2) $T = 80 \div 20$ К:

$$\bar{T} = 50 \text{ К}, \quad \bar{C}_p = 85 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \tau_2 = \frac{1,83 \cdot 10^4 \cdot 85 \cdot 60}{250 \cdot 6,28 \cdot 50 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 1,19 \cdot 10^5 \text{ с;}$$

3) $T = 20 \div 4 \text{ К}$:

$$\bar{T} = 12 \text{ К}, \quad \tau_3 = \frac{1,83 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 16}{1000 \cdot 6,28 \cdot 12 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 1,95 \cdot 10^3 \text{ с.} \quad \bar{C}_p = 5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Общее время охлаждения равно $\tau_\Sigma = 6,75 \cdot 10^5 \text{ с}$.

Расчет времени охлаждения катушки СМС в сборке

Исходные данные:

– суммарная масса катушек в сборе

$$m_\Sigma = m_{\text{кат}} + m_{\text{кож}} = 300 + 330 = 630 \text{ г} = 6,3 \cdot 10^5 \text{ кг};$$

– суммарная масса одной катушки в сборе

$$m_1 = m_{\text{кат}} + m_{\text{кож}} = \frac{6,3 \cdot 10^5}{18} = 3,5 \cdot 10^4 \text{ кг};$$

– значение теплоотдачи принимается равным $\alpha = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

– удельная теплопроводность катушки в сборе:

1) $T = 300 \div 80 \text{ К}$:

$$\bar{C}_{p,\text{сб}} = \frac{316 \cdot 1,67 \cdot 10^4 + 410 \cdot 1,83 \cdot 10^4}{3,5 \cdot 10^4} = 365,1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\tau_1 = \frac{3,5 \cdot 10^4 \cdot 365,1 \cdot 220}{250 \cdot 6,28 \cdot 190 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 9,42 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

2) $T = 80 \div 20 \text{ К}$:

$$\bar{C}_p = \frac{(94,5 \cdot 1,67 + 85 \cdot 1,83) \cdot 10^4}{3,5 \cdot 10^4} = 89,5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\tau_2 = \frac{3,5 \cdot 10^4 \cdot 89,5 \cdot 60}{250 \cdot 6,28 \cdot 50 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

3) $T = 20 \div 4 \text{ К}$:

$$\bar{C}_p = 3,81 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \tau_3 = \frac{3,5 \cdot 10^4 \cdot 3,8 \cdot 16}{1000 \cdot 6,28 \cdot 12 \cdot \frac{0,01}{1,01}} = 1,13 \cdot 10^4 \text{ с.}$$

Общее время охлаждения равно $\tau_\Sigma = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 9,93 \cdot 10^5 \text{ с}$.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое сверхпроводимость?
2. Сверхпроводимость – это идеальный проводник или идеальный диэлектрик?
3. Назовите параметры, характеризующие сверхпроводимость.
4. Назовите типы сверхпроводников по параметрам: температуре и физической природе.
5. Какие вы знаете экспериментальные методы, подтверждающие явление сверхпроводимости?
6. Что такое эффект Мейсснера?
7. В чем заключается теория Бардина–Купера–Шриффера (Б–К–Ш)?
8. Какова глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник?
9. Что такое сверхпроводники 1-го 2-го рода?
10. Изобразите качественный график зависимости удельного электрического сопротивления в окрестности T_c .
11. Каковы классические основы феноменологической теории Лондонов?
12. В чем заключается технология экструзии?
13. Чем обусловлено значение «бронзовой» технологии?
14. Опишите структуру низкотемпературного сверхпроводящего кабеля.
15. Опишите структуру высокотемпературного сверхпроводящего кабеля.
16. Назовите высокотемпературные кабели 2-го поколения.

Список рекомендованной литературы

1. Глазков, А.А. Вакуум электрофизических установок и комплексов / А.А. Глазков, Г.Л. Саксаганский. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Technical Basis for the ITER-FEAT Final Design Report. P. 21.

ГЛАВА 8. НАГРЕВ ПЛАЗМЫ И ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА

Системы дополнительного нагрева плазмы и генерации тока (H&CD) в ИТЭР необходимы для достижения всех планируемых сценариев разряда. Основными функциональными требованиями являются:

- 1) обеспечение работы в H-режиме улучшенного удержания плазмы;
- 2) достижение высокой температуры плазмы при одновременном увеличении плотности для обеспечения необходимой мощности термоядерного синтеза;
- 3) достижение устойчивого горения термоядерной реакции;
- 4) обеспечение генерации дополнительного тока для улучшенных сценариев плазменного разряда и работы с длинными импульсами;
- 5) управление параметрами разряда вблизи рабочей точки;
- 6) подавление неустойчивостей;
- 7) достижение мягкого сценария прекращения плазменного разряда.

Эти функциональные требования реализуются за счет ввода мощности систем H&CD с использованием соответствующей комбинации системы нагрева с помощью системы инжекции пучков нейтральных атомов (НИ) и трех радиочастотных систем нагрева, работающих на частоте электронного циклотронного резонанса (ЭЦРН), ионного циклотронного резонанса (ИЦРН) и частоте ниже-гибридного резонанса (НГН). НГН не будет использоваться на первом этапе эксплуатации ИТЭР. Кроме того, системы H&CD будут способствовать повышению тока плазмы и использоваться для кондиционирования (очистки) стенки вакуумной камеры. Предусматривается модернизация систем H&CD с использованием будущих технологических достижений для обеспечения более высокой эффективности преобразования энергии и генерации тока для поддержания плазмы в стационарном режиме разряда.

Неоклассические тиринг-неустойчивости (NTMs) потенциально создают проблемы для работы ИТЭР с высоким β , поэтому

предусмотрены эксперименты для активного влияния на эти неустойчивости с помощью генерации тока методом ЭЦРН. Системы Н&СD будут использоваться для подавления пилообразных колебаний в плазме, а также для индуцирования вращения плазмы, что будет способствовать более стабильным разрядам.

Для работы в стационарном режиме требуется неиндуктивная генерация тока и активное управление профилем тока плазмы, чтобы обеспечить Н-режим улучшенного удержания.

Три порта камеры зарезервированы для инжекторов НИ, два экваториальных порта назначены для систем ИЦРН, один для ЭЦРН и четыре верхних порта используются для стабилизации NTM методом ЭЦРН. Один порт зарезервирован для НГН.

При работе всех вспомогательных систем с номинальной производительностью во всех возможных зарезервированных портах будет доступно 130 МВт мощности Н&СD (хотя общая мощность одновременного нагрева ограничена 110 МВт), см табл. 8.1:

Таблица 8.1

Системы нагрева и генерации тока

Параметры	ИЦРН (~ 50 МГц)	ЭЦРН (170 ГГц)	НИИ (1МэВ)	ДНИ (100 кэВ)	НГН (5 ГГц)	Всего
Мощность системы (МВт)	20	20	20	16,5	1,6	20
Количество портов (экваториальных EP или верхних UP), используемых для первого этапа	2 EP	1 EP & 4UP	2 EP	0 EP	0	5 EP & 4UP
Общая мощность (МВт) для первой фазы	20	20	33	1,6	0	75
Максимальное возможное количество портов (EP или UP) *)	2 EP	1÷2 EP & 4UP	2÷3 EP	0 EP**)	0÷2 EP	7EP & 4UP
Максимально возможная суммарная мощность (МВт) *)	20÷40	20÷40	33÷50	1,6	0÷40	132
*)Меньшее значение соответствует предусмотренным проектным требованиям. Верхнее значение диапазона соответствует проектным требованиям возможной модернизации. Доступное количество портов ограничивает общую максимальную мощность до 133 МВт.						

8.1. Система нагрева на частоте ионно-циклотронного резонанса (ИЦРН)

Основная схема ИЦРН работает на второй гармонике ионно-циклотронной частоты трития, в смеси 50÷50% DT при частоте $f = 53$ МГц и магнитном поле $B_t = 5,3$ Тл с типичным распределением 50÷50% мощности поглощения в объеме между ионами и электронами. Добавление гелия ${}^3\text{He}$ (< 3%) в малом количестве [DT- ${}^3\text{He}$] приводит к значительному увеличению доли мощности (до 70%), поглощаемой ионами.

Частота для генерации тока на оси при $f = 55$ МГц используется для эффективной генерации тока в центре ~ 20 кА/ МВт. Ионный ток может генерироваться для управления пилообразными колебаниями на частоте 40 МГц. Рабочий диапазон $\Delta f = 40\div 55$ МГц охватывает все физические сценарии ИЦРН и позволяет работать при уменьшенном на 70% тороидальном поле. Система показана на рис. 8.1.

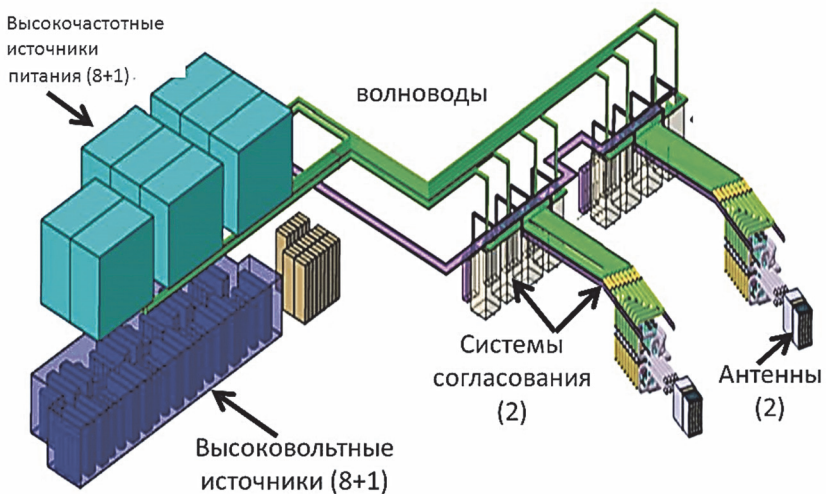


Рис. 8.1. Система нагрева плазмы ИЦРН

Конструкция антенны системы ИЦРН: две антенны выполнены в виде сменных штекеров, вставленных в экваториальные порты корпуса, с номинальной установленной мощностью на порт (20 МВт / порт), что соответствует средней плотности мощности $9,2 \text{ МВт} / \text{м}^2$ на границе плазмы в оптимальных условиях связи антенны с плазмой. Антенны включают нейтронный стальной экран толщиной около 1 м, который уменьшает поток нейтронов высокой энергии ($E > 1 \text{ МэВ}$) за пределами запорной пластины до $1,18 \times 10^7 \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и ограничивает интегрированный уровень активации в межпространственной зоне порта до уровня $< 100 \text{ мкЗв/ч}$ через 15 дней после отключения. Таким образом, будет разрешено обслуживание компонентов в межпортовом пространстве. Нейтронный экран пронизан компонентами коаксиальных линий передачи. Изгибы и изменения диаметра включены в их траекторию, чтобы уменьшить радиальный поток нейтронов.

Компоненты, обращенные к плазме, и нейтронный экран охлаждаются водой под давлением, распределяемой по общему контуру охлаждения. Коллекторы охлаждающей жидкости расположены внутри опорной конструкции.

Вакуумные окна выполнены из керамики (предпочтительным кандидатом является оксид бериллия BeO) с активным водяным охлаждением.

Антенна представляет собой решетку из элементов 4×6 , питаемых восемью коаксиальными линиями передачи, каждая из которых имеет номинальную радиочастотную мощность 2,5 МВт. На рисунке 8.2. показан вид одного из четырех модулей. Каждый модуль оснащен двумя параллельными радиочастотными цепями, представляющими собой три полосы на передней части антенны, экранированные экраном Фарадея. Концепция антенны является модульной, с четырьмя модулями, установленными в окружающую конструкцию корпуса. Основными компонентами модуля являются:

– передняя часть модуля, которая обеспечивает экранирование и содержит два четырехпортовых соединения и шесть тоководов;

– съемные вакуумные линии передачи, которые включают в себя две параллельные электрические цепи. Каждый контур оснащен двумя вакуумными вводами с регулируемым вакуумным промежуток, сервисной заглушкой для подачи охлаждающей воды и диагностики для дуговой защиты и измерения мощности.

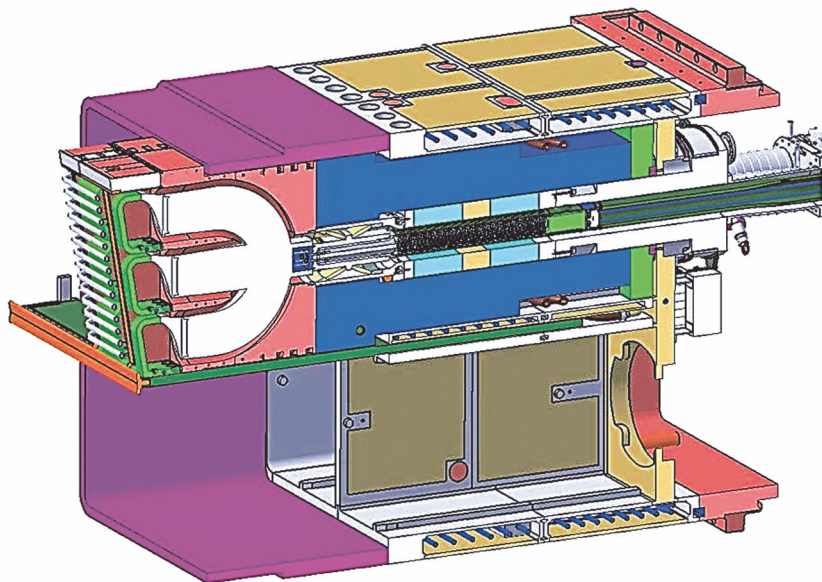


Рис. 8.2. Вид системы ИЦРН с антенной

8.2. Система нагрева на частоте электронно-циклотронного резонанса (ЭЦРН)

Система ЭЦРН и генерации тока имеет мощность 26 МВт (рис. 8.3). Основными задачами системы являются обеспечение пробоя и нагрева плазмы на начальной стадии разряда, далее нагрев плазмы в центральной зоне H&CD и контроль активности МГД. Это достигается за счет комбинации двух типов нагревных комплексов, один из которых расположен в экваториальном порту, а второй – в четырех верхних портах. Экваториальный комплекс ЭЦРН (EL) будет обеспечивать передачу ВЧ-волн в зону от оси

плазмы до среднего радиуса разряда для нагрева плазмы в центральной зоне и генерации тока, в то время как верхние нагревные комплексы (UL) будут иметь доступ к внешней половине плазменного радиуса с очень узким пиковым профилем поглощения волн для управления неоклассическими тиринг-модами (NTM) и пилообразными колебаниями.

Основными требованиями к системе ЭЦРН являются следующие:

- обеспечение дополнительного нагрева для работы в H-режиме и достижения $Q = 10$;
- обеспечение генерации тока на оси и вне оси в пространственной зоне $0 < r/a < 0,5$, включая одну треть общей мощности для дополнительной генерации тока в пространственной зоне $0 < r/a < 0,3$;
- управление МГД-неустойчивостями с помощью локализованной генерации тока и модуляции мощности в диапазоне частот до 5 кГц;
- нагрев во время старта разряда;
- обеспечение завершения разряда без катастрофических последствий.

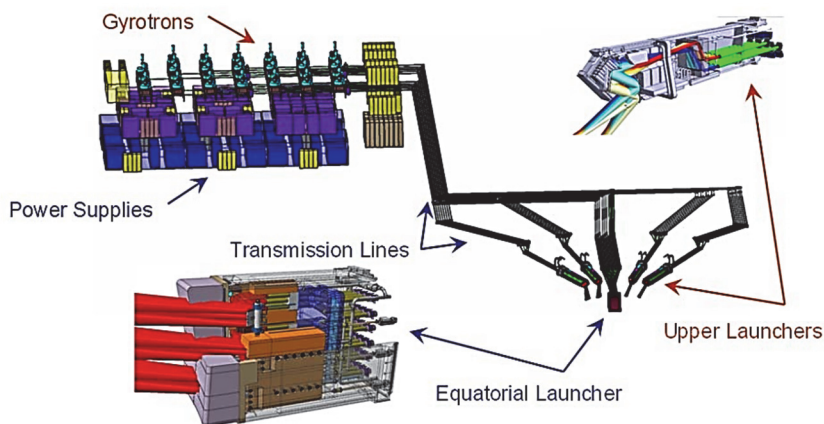


Рис. 8.3. Схема системы нагрева ЭЦРН: гиротроны, комплексы нагрева в экваториальном порту и в верхних портах

Система ЭЦРН состоит из 26 гиротронов мощностью до 1 МВт, работающих на частоте 170 ГГц, источников питания гиротронов, 24 линий передачи и пяти антенн (комплексов).

Гиротрон – источник радиочастотного излучения, в котором мощные миллиметровые волны генерируются с электрическим КПД $\geq 50\%$. Гиротронная система состоит из гиротронной трубки, криомагнита (6,6 Т) и вспомогательных систем (источников питания, опорных конструкций, катушек и т.д.).

Гиротроны и источники питания установлены в южной части специального здания (индекс этого здания на площадке ИТЭР – RF) на расстоянии 80 м от оси токамака (такое удаление требуется для предотвращения влияния рассеянного полоидального магнитного поля в работу гиротронов). Длина линии передачи составляет примерно 160 м, генерируемая радиочастотная мощность передается либо на экваториальный (EL), либо на четыре верхних (UL) нагревных комплекса. Дистанционно управляемый переключатель в линии передачи отключает/включает питание комплексов в зависимости от программы физического применения: EL для нагрева центральной плазмы и генерации тока или UL, используемого для управления МГД активностью.

Экваториальный нагревный комплекс (EL) показана на рис. 8.4.

Три зеркала управления обеспечивают тороидальное управление для максимального увеличения управляемого тока в системах центрального нагрева и генерации тока. Всего 24 волновода входят в комплекс через запорную пластину, сгруппированные в три набора по восемь лучей. Каждый пучок проходит через три поворотных зеркала (на 90 градусов), чтобы уменьшить поток нейтронов по траектории пучка. Четвертое зеркало расположено сразу за модулем защитного экрана (BSM) и используется для направления лучей в тороидальном направлении в угловом диапазоне $20 \leq \beta \leq 40$. Изменение мощности поглощения достигается за счет доплеровского сдвига резонанса с большим тороидальным углом инжекции.

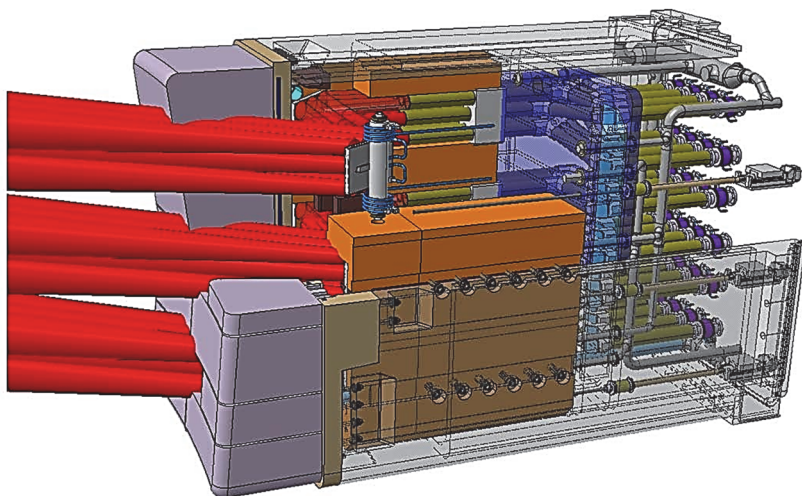


Рис. 8.4. Экваториальный нагревный комплекс ЭЦРН

Один из четырех верхних комплексов ЭЦРН (UL) показан на рис. 8.5. Он используется для доступа к зоне на внешнем обводе разряда ($0,3 < r/a < 0,95$) для управления и подавления МГД активности плазмы. Четыре зеркала используются для перенастройки и фокусировки ВЧ волн (лучей) для получения узкого профиля поглощения плазмой, идеально подходящего для управления МГД-активности. Восемь лучей сгруппированы в два набора по четыре луча. Подобно экваториальному комплексу, пучки в верхних комплексах проходят через три зеркала, чтобы уменьшить выход потока нейтронов через порт. Конечное зеркало вдоль каждой траектории луча представляет собой вращающееся зеркало, направляющее лучи в почти вертикальной плоскости с постоянным тороидальным углом инжекции. Тороидальный угол инжекции оптимизирован для обеспечения максимальной плотности тока, подходящей для управления активностью МГД, стабилизации неоклассических тиринг-мод и для изменения периода пилообразных колебаний.

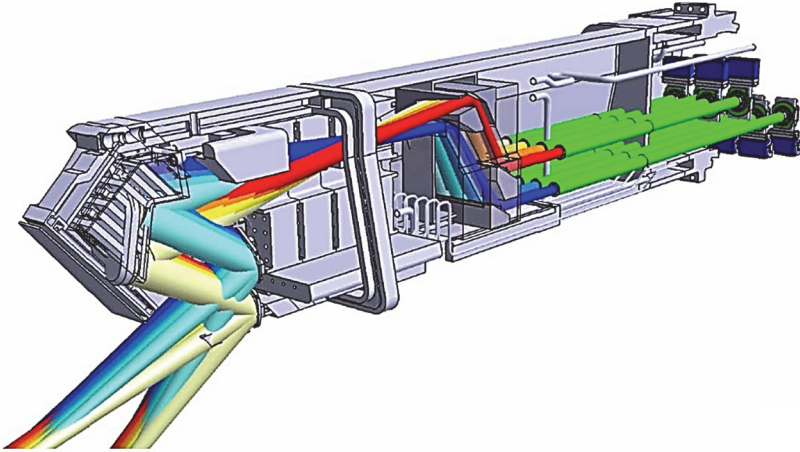


Рис. 8.5. Верхний нагревный комплекс ЭЦРН

Диапазоны управления комплексов ЭЦРН выбраны для достижения максимального охвата поперечного сечения плазмы, чтобы применить систему ЭЦРН для различных задач, как показано на рис. 8.6.

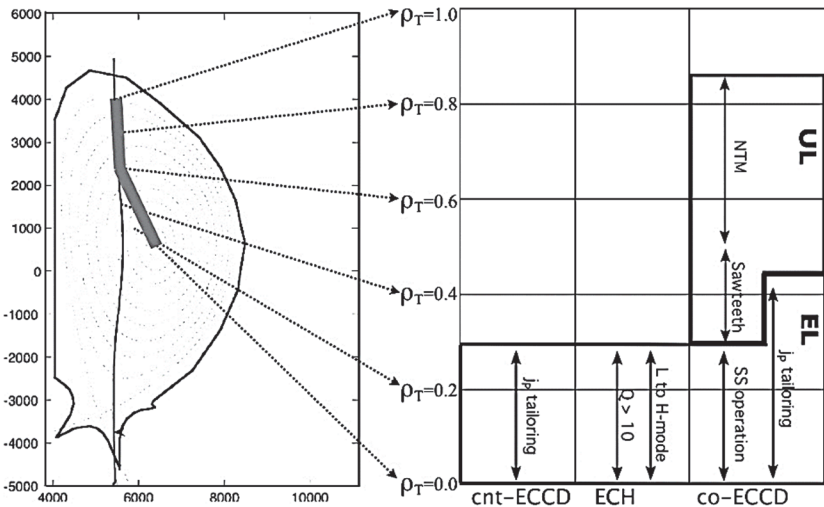


Рис. 8.6. Предполагаемое применение системы ЭЦРН в различных зонах плазменного разряда

Верхний комплекс используется для применений, требующих узкого профиля поглощения (для подавления неоклассических тиринг-мод и пилообразных колебаний), поэтому его оптическая система предназначена для обеспечения очень узкого и остроконечного профиля поглощения. Экваториальный комплекс используется для нагрева центральной плазмы и генерации тока с широким профилем нагрева и увеличенным суммарным током.

В ИТЭР будут поставлены три типа гиротронов: коаксиальный гиротрон мощностью 2 МВт (рис. 8.7а) разработанный Европейским союзом; триод мощностью 1 МВт (см. рис. 8.7б), разработанный Японией; и диод мощностью 1 МВт (см. рис. 8.7в), разработанный в России.

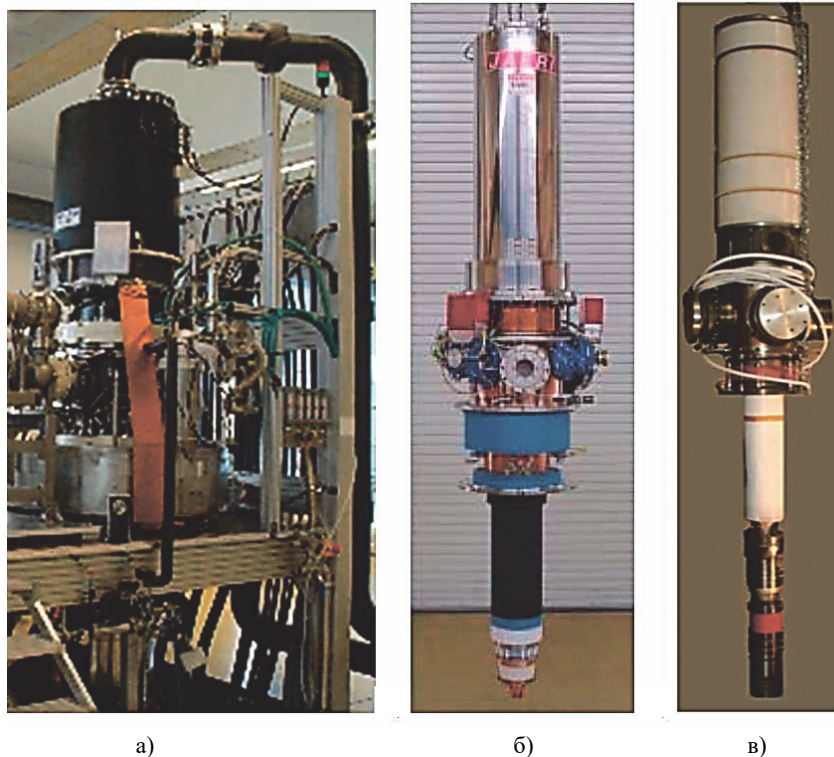


Рис. 8.7. Три типа гиротронов для ЭЦРН в ИТЭР, основаны на конструкции, разработанной в ЕС (а); Японии (б); России (в)

8.3. Система нагрева пучками нейтральных атомов

Система нагрева пучками нейтральных атомов (ННИ) состоит из двух инжекторов пучков нейтральных атомов (нейтральный инжектор – НИ), способных передавать плазме общую мощность 33 МВт и сможет работать в течение длительных импульсов (до 3600 с). Предусмотрена установка третьего НИ и связанных с ним вспомогательных систем, что позволит увеличить общую вводимую мощность до 50 МВт. Каждый инжектор способен работать либо на дейтерии D, либо на водороде H и будет выдавать пучки мощностью 16,5 МВт либо 1 МэВ пучок атомов D, либо 870 кэВ пучок атомов H, табл. 8.2. Все инжекторы установлены в специальном помещении.

Система НИ основана на ускорении и последующей нейтрализации отрицательных (D или H) ионов. Использование отрицательных ионов выгодно тем, что эффективность нейтрализации положительных ионов при использовании газовой мишени очень низка при энергиях выше ≈ 50 кэВ/нуклон, тогда как эффективность нейтрализации отрицательных ионов остается высокой ($\approx 60\%$) при всех энергиях до 1 МэВ, пучки такой энергии эффективны для нагрева плазмы.

Система диагностического нейтрального инжектора (ДНИ)

Инжектор ДНИ выдает модулированный пучок атомов H с энергией 100 кэВ 3-секундными импульсами каждые 23 секунды. Мощность, вводимая ДНИ, составляет $\approx 1,6$ МВт. ДНИ будет также генерировать последовательность импульсов прямоугольной формы с модуляцией 5 Гц >15 А, эквивалентную 100 кэВ H. Основная цель ДНИ состоит в том, чтобы обеспечить измерение плотности альфа-частиц в плазменном разряде посредством детектирования света от иона гелия He^+ , создаваемого путем обмена зарядами с входящим пучком атомов H.

Энергия ДНИ была выбрана с учетом изменения поперечного сечения обмена зарядами и проникновения нейтрального пучка в плазму.

**Расчетные параметры инжекторов нейтральных атомов
для нагрева и генерации тока**

Параметр	Ион D-	Ион H-
Мощность одного инжектора, МВт	16,5	16,5
Энергия пучка, МэВ	1	1
Ток пучка, А	40	46
Плотность тока, А/м ²	200	260
Неоднородность плотности тока	10%	10%
Давление в источнике, Па	<0,3	<0,3
Длительность одного импульса, с	до 3600	до 3600

**8.4. Система нагрева и генерации тока
на частоте ниже-гибридного резонанса**

Система нагрева и генерации тока на частоте нижегибридного резонанса (НГРН) предназначена для генерации тока и управления профилем тока, общая мощность системы 20 МВт на фиксированной частоте от 3,7 до 5 ГГц.

Система будет генерировать ток в плазменном разряде с эффективностью $(2\div 3)\times 10^{20} \text{ м}^{-3}\cdot\text{МА}\cdot\text{МВт}^{-1}$. В ИТЭР это примерно эквивалентно току $\sim 1,5 \text{ МА}$ в области $0,5 < r/a \leq 0,8$. Такой дополнительный ток может обеспечить стационарную работу реактора. Это качество необходимо в дополнение к индуктивной генерации тока в плазме за счет индуктора, который способен генерировать ток ограниченное время около 400 секунд.

Эффективная связь антенны системы НГРН с плазмой требует наличия достаточной плотности плазмы между антенной и сепаратрисой: $n_e > 3\cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

Система предназначена для работы при следующих параметрах:

- максимальное электрическое поле волновода 3,2 кВ/мм (или плотность мощности 33 МВт/м²) при полной мощности системы;
- волновое число $1,8 < n_{//} < 2,2$;
- типичный коэффициент отражения нагрузки 5%, измеренный на входе антенны.

Конструкция НГРН показана на рис. 8.8. Антенна, обращенная к плазме, представляет собой сфазированную решетку, состоящую из четырех модулей (2×2) пассивно-активных многопереходных модулей (ПАМ). Каждый модуль ПАМ состоит из 24 активных и 25 пассивных волноводов прямоугольного сечения, последовательно расположенных по квадратуре, чтобы возбуждать бегущую медленную волну, распространяющуюся в тороидальном направлении. Фазовый сдвиг получается путем установки фазовращателей, кратных $\pi/2$, в соседних группах волноводов.

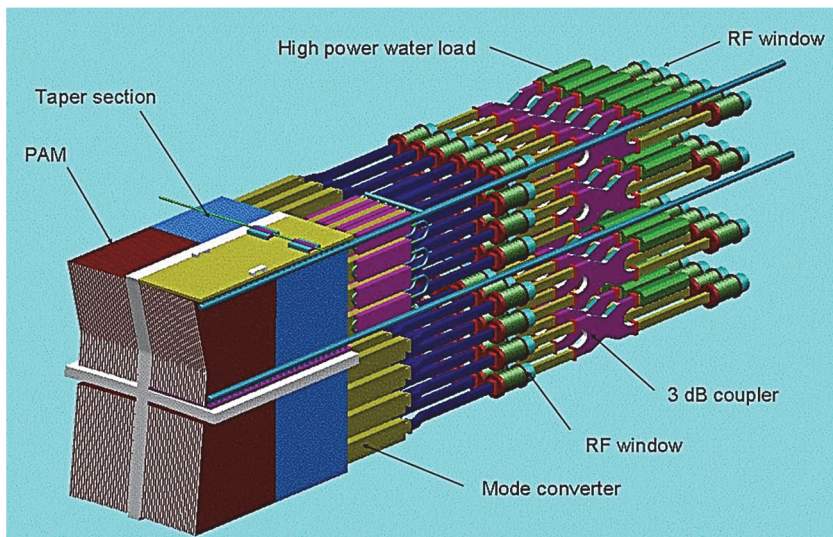


Рис. 8.8. Комплекс для нагрева плазмы и генерации тока на частоте ниже-гибридного резонанса (НГРН)

Контрольные вопросы и задания

1. Какие системы дополнительного нагрева и генерации тока используются в ИТЭР?
2. Какие требования предъявляются к системам дополнительного нагрева и генерации тока в ИТЭР?
3. Какая общая мощность всех систем дополнительного нагрева плазмы в ИТЭР?
4. Перечислите параметры системы нагрева на частоте ионно-циклотронного резонанса в ИТЭР.
5. Перечислите компоненты системы нагрева на частоте ионно-циклотронного резонанса в ИТЭР.
6. Перечислите параметры системы нагрева на частоте электронно-циклотронного резонанса в ИТЭР.
7. Перечислите компоненты системы нагрева на частоте электронно-циклотронного резонанса в ИТЭР.
8. Опишите зоны поглощения ВЧ мощности комплексов ЭЦРН и задачи их применения.
9. Перечислите параметры системы нагрева пучками нейтральных атомов в ИТЭР.
10. Перечислите компоненты системы нагрева пучками нейтральных атомов в ИТЭР.
11. Перечислите параметры системы диагностического нейтрального инжектора.
12. Для чего предназначен нагревный комплекс на частоте нижнегибридного резонанса в ИТЭР?
13. Перечислите параметры системы нагрева и генерации тока на частоте нижнегибридного резонанса.
14. Опишите конструкцию системы нагрева и генерации тока на частоте нижнегибридного резонанса.

Список рекомендованной литературы

1. FUNDAMENTALS OF MAGNETIC FUSION TECHNOLOGY - EDITED BY: GUIDO VAN OOST INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA.

URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1945_web.pdf

2. ITER Physics Basis, Editors / F.W. Perkins, D.E. Post, N.A. Uckan, et al. Nuclear Fusion, IAEA, Vienna. – 1999. – №. 39. – Vol. 12.

ГЛАВА 9. СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ИТЭР

Тепло, выделяемое во внутрикамерных компонентах и в вакуумной камере, воспринимается СВОР. Система СВОР спроектирована для работы с тритием и радиоактивными коррозионными отложениями. Некоторые элементы СВОР используются при нагреве стенок вакуумной камеры для очистки поверхностей, обращенных к плазме, путем выделения захваченных примесей. Весь токамак заключен в криостат с тепловыми экранами между горячими компонентами и магнитами с криогенным охлаждением. СВОР представляет собой сложную сеть трубопроводов, которая подразделяется на четыре первичные системы теплообмена, систему водоподготовки и резервуаров, системы залива и слива воды, систему сушки. Насосы, фильтры, сосуды под давлением, теплообменники, клапаны, трубопроводы, арматура являются компонентами СВОР. Кроме того, СВОР включает в себя монтажные конструкции, контрольно-измерительные приборы и устройства управления, электродвигатели, нагреватели, контроллеры мощности и соответствующую проводку. Все компоненты СВОР расположены в здании реактора и в тритиевом корпусе.

9.1. Особенности теплообмена в оборудовании термоядерных реакторов и установок

Первая стенка. Конструкция первой стенки имеет модульный принцип. Каждый модуль состоит из защитного блока из нержавеющей стали толщиной 500 мм и панели первой стенки, облицованной бериллиевыми пластинами. В блоке обеспечивается подвод/отвод теплоносителя к пальцам. Панель первой стенки, набрана из отдельных элементов (так называемых пальцев), воспринимает тепловую нагрузку. Соединение панели с блоком обеспечивается болтовым соединением. Как отмечалось выше, различают «обычные» панели (с плотностью теплового потока $1\div 2$ МВт/м²) и «улучшенные» панели (с плотностью теплового потока $3,5\div 5$ МВт/м²). Для пальцев «улучшенной» панели реализовано внутреннее оребрение (гипевапатрон) для интенсификации теплообмена. Охлаждение панелей первой стенки осуществляется в режиме вынужденной однофазной конвекции турбулентным потоком воды.

Дивертор

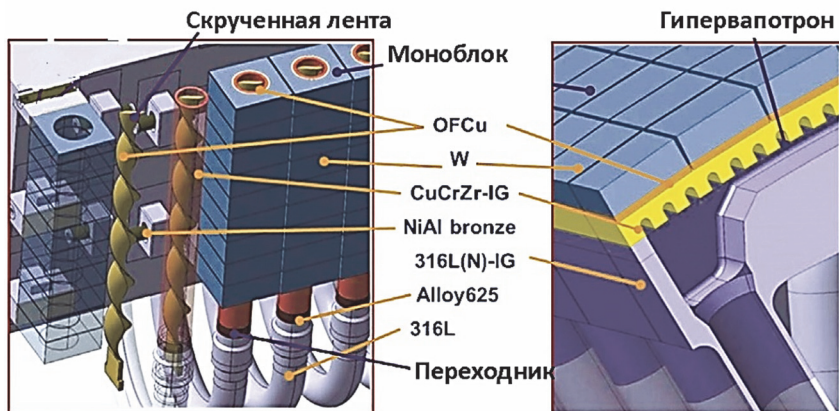
Дивертор состоит из нескольких приемников (рис. 9.1): вертикальные приемники, купол и отражающие пластины. Наиболее теплонапряженными являются вертикальные приемники, нижняя часть которых сконструирована из моноблоков вольфрама, напаянных на медную трубку. Внутри трубок установлена скрученная лента для интенсификации теплообмена. Охлаждение купола и отражающих пластин реализовано с внутренним оребрением (гипеватрон).

Приемники пучков

Кроме первой стенки и дивертора одностороннему нагреву подвержен и ряд других теплообменных устройств. Прежде всего, это приемники пучков системы инжекции быстрых нейтральных атомов, используемых для дополнительного нагрева плазмы. Проектные параметры системы инжекции нейтральных атомов ИТЭР, состоящей из двух параллельно работающих инжекторов, согласно проектной документации должны обеспечивать для каждого инжектора введение в плазму мощности 16,5 МВт при ускоряющем напряжении 1 МВ и плотности тока в источнике 200 А/м².

Максимальные плотности тепловых потоков в нормальном к оси пучка сечении могут достигать 200 МВт/м². Расположение воспринимающей поверхности приемников под острым углом к оси пучка позволяет существенно снизить уровень воспринимаемых тепловых нагрузок. Конструкция приемника пучков нейтральных атомов принята подобной рис. 9.2, с однорядным расположением труб из упрочненной меди с прямоугольным внешним периметром и цилиндрическим каналом охлаждения.

Эффективность работы устройства определяется нейтрализатором, дополнительными потерями при повторной ионизации, наличием остаточного фонового газа и обратного рассеяния. Все это приводит к тому, что менее половины мощности ускоренного ионного пучка подается в плазму в виде нейтральных частиц. В приемниках отклоненных ионов выделяется около 17 МВт тепловой мощности при пиковой плотности теплового потока 7 МВт/м². Схема нейтрализатора представлена на рис. 9.3, сечение приемной пластины 22×90 мм, диаметр канала охлаждения 14 мм.



а)

б)

Рис. 9.1. Охлаждение дивертора:
а – вертикальная пластина; б – купол

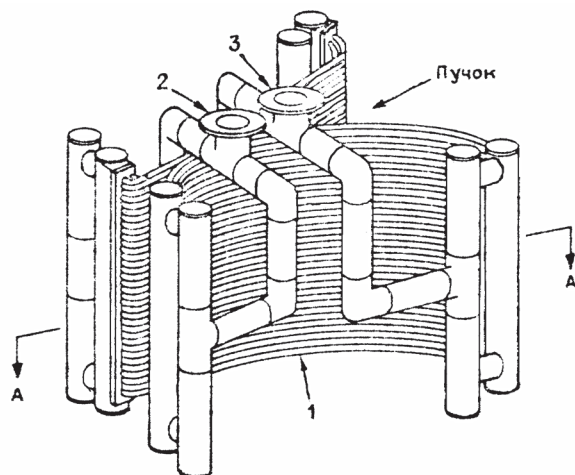


Рис. 9.2. Приемник нейтральных атомов системы инжекции:
1 – пакет теплосъемных трубок; 2 – входной коллектор;
3 – выходной коллектор

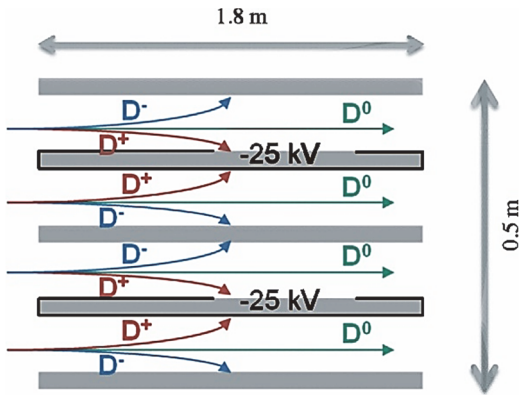


Рис. 9.3. Схема нейтрализатора атомов с приемными пластинами ионов

Проектные параметры воспринимаемых плотностей тепловых потоков для диверторных приемников и приемников пучков системы инжекции реактора ИТЭР приведены в табл. 9.1. Данные табл. 9.1 показывают, что приемники должны обеспечивать безаварийное и эффективное охлаждение при уровне тепловых нагрузок, превосходящих характерные для традиционной энергетики ($\sim 1 \text{ МВт/м}^2$) более чем на порядок.

Таблица 9.1

Характеристики диверторных приемников и приемников пучков системы инжекции реактора ИТЭР

Вид приемника	Плотность теплового потока, МВт/м ²	Длительность импульса, с
<i>Диверторные приемники</i>		
Купол	5	> 1000
Вертикальные приемники	20	10
	5	> 1000
Выходной приемник	20	10
	5	> 1000
Облицовка	1	> 1000
<i>Приемники пучков системы инжекции</i>		
Приемник отклоненных ионов	6	> 1000
Приемник атомов	22	> 1000

Охлаждение диверторных приемников и приемников пучков системы инжекции осуществляется недогретым до температуры насыщения, закрученным с помощью вставленных на всю длину скрученных лент, потоком воды. Проектные параметры потоков приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

**Проектные характеристики потока воды
систем охлаждения диверторных приемников
и приемников пучков системы инжекции реактора ИТЭР**

Вид приемника	Давление на входе, МПа	Потери давления в приемнике, МПа	Скорость, м/с	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С
Диверторные приемники	4,2	1,6	12	100	150
Приемники пучков	2,0	1,0	10	75	110

Перечисленные приемники являются ключевыми тепловоспринимающими элементами ИТЭР. Характерными особенностями теплообмена в них являются:

- высокие плотности тепловых потоков;
- необходимость интенсификации теплообмена;
- односторонний нагрев.

Система охлаждения ИТЭР в целом является сложнейшей инженерной системой, обеспечивающей рекуперацию около 1 ГВт тепловой энергии, выделяющейся не только в плазме, но в многочисленном вспомогательном оборудовании.

9.2. Основы теплообмена применительно к задачам ИТЭР

Основной задачей гидродинамики и теплообмена в термоядерных установках и реакторах является охлаждение и термостабилизация (поддержание в заданном температурном интервале)

первой стенки, дивертора, вакуумной камеры и других элементов термоядерных установок и реакторов, различных технологических систем. Описание охлаждаемых конструктивных элементов представлено выше.

Преимущественным режимом теплообмена в обращенном к плазме оборудовании ИТЭР при движении жидкости в каналах охлаждения и вспомогательных устройствах является вынужденная однофазная турбулентная конвекция. Нестационарные тепловые нагрузки, характерные для ИТЭР, могут приводить к кипению теплоносителя в каналах охлаждения, и, следовательно, необходимо знание теплообмена при кипении и запасов до кризиса теплообмена.

9.2.1. Основные понятия, определения и законы

Простейшей моделью для охлаждения реального оборудования ИТЭР является канал с циркулирующим теплоносителем (рис. 9.4). Жидкость циркулирует с массовым расходом G (кг/с), подводится тепловой поток плотностью q (Вт/м²), температура жидкости на входе $T_{\text{вх}}$, на выходе $T_{\text{вых}}$, площадь поверхности канала охлаждения S .

На входном участке происходит установление течения и теплообмена, для турбулентного режима течения в трубе длины начальных гидродинамических и тепловых участков обычно принимают равным 20 относительным длинам (отношение длины к диаметру трубы). Далее рассматриваются стабилизированное течение и теплообмен.

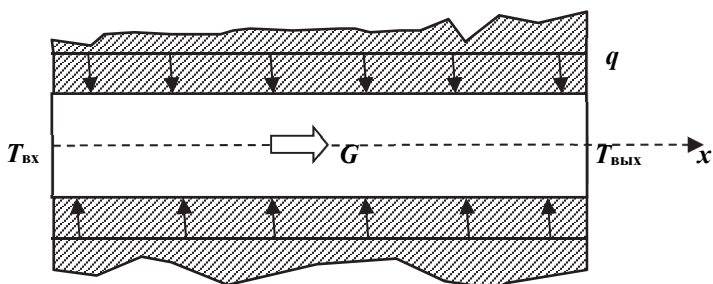


Рис. 9.4. Схема канала охлаждения в теле конструкции

Выразим тепловой поток, воспринятый теплоносителем:

$$Q = qS = c_p m(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})/t = c_p G(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (9.1)$$

где c_p – изобарная теплоемкость жидкости; Дж/кг·К.

Закон Ньютона–Рихмана устанавливает связь между плотностью теплового потока на стенке и разностью температур между стенкой и жидкостью:

$$q = \alpha(T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}). \quad (9.2)$$

Коэффициент теплоотдачи (КТО) α , Вт/м²·К, при однофазной конвекции определяется параметрами течения теплоносителя. При течении жидкости в каналах некруглого сечения в качестве геометрического размера используется гидравлический диаметр:

$$d_r = 4F/P, \quad (9.3)$$

где F – площадь проходного сечения канала, м²; P – смоченный жидкостью периметр, м. Для цилиндрического канала гидравлический диаметр равен геометрическому.

Закономерности, определяющие течение и теплообмен однофазной жидкости, удобно выражать через безразмерные числа подобия:

$Nu = \alpha d_r / \lambda$ – число Нуссельта (безразмерный КТО), λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/м·К;

$Re = u d_r / \nu = \rho u d_r / \mu$ – число Рейнольдса; u – скорость жидкости, м/с; ρ – плотность, кг/м³; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; произведение ρu называют массовой скоростью, кг/м²·с;

$Pr = \nu / a = \mu c_p / \lambda$ – число Прандтля (безразмерная характеристика теплофизических свойств веществ), где $a = \lambda / \rho c_p$ – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Число Рейнольдса позволяет разделить ламинарные и турбулентные режимы течения. Для круглой трубы при $Re < 2300$ реализуется ламинарное течение, при больших числах переходное и турбулентное.

При ламинарном течении получены точные решения для стабилизированного теплообмена. При постоянной температуре стенки $Nu = 3,657$, при постоянной плотности теплового потока на стенке $Nu = 48/11 = 4,364$. Коэффициент гидравлического сопротивления определяется формулой Пуазейля $\xi = 64/Re$.

При турбулентном течении используются приближенные решения. Так в зарубежной литературе часто применяют эмпирическую формулу Диттуса–Белтера:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4}, \quad (9.4)$$

где свойства жидкости, входящие в числа подобия, определяют по среднemasсовой температуре. Диапазон применения $Pr = 0,7 \div 10$, $Re = 5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^5$.

В отечественной литературе используют формулу Михеева М.А.:

$$Nu = 0,021Re_{ж}^{0,8}Pr_{ж}^{0,43}(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}, \quad (9.5)$$

где физические свойства, входящие в числа подобия с индексом «ж», определяют по среднemasсовой температуре жидкости, а с индексом «ст» – по температуре стенки. Поправка $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$ используется для учета зависимости физических свойств от температуры. Диапазон применения $Pr = 0,7 \div 10$, $Re = 1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5$.

Наиболее широкий диапазон применения имеет формула Петухова Б.С. с сотрудиниками, показывающая наилучшее соответствие с экспериментальными данными:

$$Nu = \frac{Re Pr (\xi / 8)}{1 + 900 / Re + 12,7 \sqrt{\xi / 8} (Pr^{2/3} - 1)}. \quad (9.6)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле Г.К. Филоненко:

$$\xi = (1,821gRe - 1,64)^{-2}. \quad (9.7)$$

Свойства жидкости, входящие в числа подобия (9.6) и (9.7), определяют по среднemasсовой температуре жидкости. Для учета зависимости физических свойств от температуры используют поправку $(\mu_{ж}/\mu_{ст})^{0,11}$, в которой коэффициент динамической вязкости с индексом «ж» определяют по среднemasсовой температуре жидкости, а с индексом «ст» – по температуре стенки. Диапазон применения $Pr = 0,1 \div 200$, $Re = 5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$.

Расчет потерь давления в каналах проводят с использованием формулы Дарси–Вейсбаха:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho u^2}{2} \frac{l}{d_r}. \quad (9.8)$$

Для турбулентного режима течения при расчете коэффициента гидравлического сопротивления кроме формулы Филоненко (9.7) часто используют формулу Блазиуса (для $Re < 1 \cdot 10^5$):

$$\xi = 0,316 / Re^{0,25}. \quad (9.9)$$

При превышении температурой стенки температуры насыщения жидкости при данном давлении становится возможным кипение теплоносителя. При достаточной длине канала и плотности теплового потока могут реализовываться следующие характерные режимы теплообмена: однофазная конвекция, пузырьковое кипение, пленочное кипение с соответствующими переходными зонами. Типичная кривая кипения – зависимость плотности теплового потока от перегрева стенки относительно температуры насыщения для условий свободной конвекции представлена на рис. 9.5.

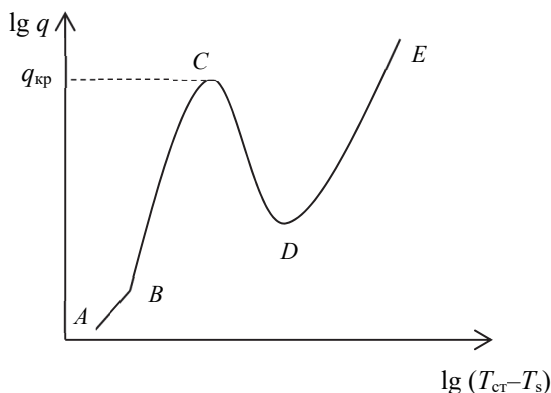


Рис. 9.5. Типичная кривая кипения

На рисунке 9.5 участок AB соответствует однофазной конвекции, в точке B начинается переход к участку пузырькового кипения BC , заканчивающийся в точке C кризисом теплоотдачи при кипении (достигается наибольшая плотность теплового потока на стенке при пузырьковом кипении – $q_{кр}$, для кипения воды в условиях свободной конвекции в состоянии насыщения при атмосферном давлении $\sim 1 \text{ МВт/м}^2$). Участок CD является

переходным к так называемому режиму пленочного кипения *DE*. Достижение кризиса теплообмена в условиях работы оборудования ИТЭР сопровождается значительным неконтролируемым ростом температуры и приводит к аварии теплообменного оборудования. Область рабочих параметров оборудования на соответствующий коэффициент запаса *n* всегда меньше $q_{кр}$. Для оборудования ИТЭР $n = 1,5 \div 2$.

Для расчета теплообмена при пузырьковом кипении для условий свободной конвекции используют зависимости:

1. Д.А. Лабунцова:

$$A = 3,4 \cdot p^{0,18} \cdot q^{2/3} / (1 - 0,0045 \cdot p), \quad (9.10)$$

где *p* в барах, *q* в Вт/м², диапазон давлений $p = (1 \div 200) \cdot 10^5$ Па;

2. В.В. Ягова:

$$q_{кип} = 3,43 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda^2 \Delta T_s^3}{\nu \sigma T_s} \left(1 + \sqrt{1 + 800B} + 400B \right), \quad (9.11)$$

где $B = \frac{r}{\sigma} \left(\frac{(\nu \rho_n)^3}{\lambda T_s} \right)^{0,5}$.

В уравнении (2.11) безразмерный теплофизический комплекс *B* отражает влияние давления.

Для расчета $q_{кр}$ в условиях свободной конвекции вне области малых приведенных давлений жидкости ($p/p_{кр} > 0,003$) используют формулы:

1. С.С. Кутателадзе:

$$q_{кр} = 0,14 \cdot r \cdot \sqrt{\rho_n} \sqrt[4]{\sigma g (\rho - \rho_n)}; \quad (9.12)$$

2. В.В. Ягова:

$$q_{кр} = 0,06 \cdot r \cdot \rho_n^{0,6} \sigma^{0,4} \left[\frac{g(\rho - \rho_n)}{\mu} \right]^{0,2}. \quad (9.13)$$

В формулах (9.11)–(9.13) все свойства определяются в состоянии насыщения, индекс «п» относит к паровой фазе, без индекса – жидкость, *r* – теплота парообразования (Дж/кг), σ – поверхностное натяжение (Н/м), *g* – ускорение свободного падения (м/с²).

При циркуляции кипящего теплоносителя в трубах важно знать режимы течения двухфазного потока. На теплоотдачу оказывают влияние как механизмы вынужденной конвекции, так и пузырькового кипения. Подробно расчет теплообмена в трубах при пузырьковом кипении в условиях ИТЭР рассмотрен далее. В первом приближении для расчета теплообмена при пузырьковом кипении насыщенного потока в трубах можно использовать формулы Н.Г. Рассохина:

$$A = 3,1 \cdot p^{0,25} \cdot q^{2/3} \quad \text{при } p = (1 \div 80); \quad (9.14)$$

$$A = 0,027 \cdot p^{1,33} \cdot q^{2/3} \quad \text{при } p = (80 \div 200), \quad (9.15)$$

где p в барах, q в Вт/м².

9.2.2. Теплообмен в каналах при вынужденной однофазной конвекции

Теплообмен в условиях вынужденной конвекции является основным механизмом охлаждения оборудования ИТЭР. Постановка такой задачи важна для численного и экспериментального моделирования теплообмена в элементах оборудования ИТЭР.

Теплоноситель рассматривается как сплошная среда. Состояние потока характеризуется параметрами состояния – температурой и давлением, а также скоростью, значения которых необходимо знать в каждой точке потока в данный момент времени. Полагается, что свойства жидкости (вязкость, теплопроводность и др.), в общем случае зависящие от параметров состояния жидкости, заданы. Состояние потока жидкости определено, если известна зависимость температуры T , давления p и скорости u от координат и времени (x, y, z, τ) . Зная поля температур, давления и скорости, а также физические свойства жидкости, можно определить величины, характеризующие теплообмен и течение жидкости.

Для нахождения T , p и u используют законы сохранения: массы, импульса, момента импульса, энергии. Для замыкания системы используют материальные уравнения: закон трения Ньютона и закон теплопроводности Фурье. Законы сохранения массы,

импульса и энергии, записанные в дифференциальной форме применительно к потоку с учетом материальных уравнений, называют уравнениями неразрывности, движения и энергии соответственно, составляющими замкнутую систему. Решение системы уравнений при заданных краевых условиях позволяет определить искомые значения T , p и u . Следует заметить, что подобный подход напрямую применим в основном к ламинарным течениям. Проблемы решения системы уравнений для турбулентных течений обсуждаются далее. Запишем уравнения неразрывности, движения и энергии для однофазной химически однородной жидкости. Подробное обсуждение и вывод уравнений приведен в [1–4].

1. Уравнение неразрывности ($m = \text{const}$):

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0. \quad (9.16)$$

2. Уравнение движения ($\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum \vec{F}_i$) для несжимаемой жидкости – уравнение Навье–Стокса:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g}, \quad (9.17)$$

в правой части уравнения слагаемые – силы давления, вязкости, тяжести соответственно.

3. Уравнение энергии (баланс энергии частицы жидкости):

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} - \beta T \frac{dp}{dt} = \mu \Phi_{\text{дисс}} + \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_V, \quad (9.18)$$

в левой части уравнения второе слагаемое – работа сил давления, в правой части – диссипация энергии ($\Phi_{\text{дисс}}$ – диссипативная функция), приток энергии молекулярным переносом и внутреннее тепловыделение соответственно.

В практических задачах наиболее часто используется цилиндрическая система координат. С учетом постоянства свойств несжимаемой жидкости, без учета работы сил давления и диссипации

энергии, отсутствии массовых сил и внутреннего тепловыделения, для двухмерного осесимметричного движения система уравнений (9.16)–(9.18) имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} &= 0, \\ \frac{du_x}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial r} \right), \\ \frac{du_r}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right), \\ \frac{dT}{dt} &= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \end{aligned} \tag{9.19}$$

При записи системы (9.19) не учитываются конкретные условия течения и теплообмена, тогда как формирование полей температуры, давления и скорости существенным образом зависит от этих условий. Для решения конкретной задачи к основным уравнениям необходимо добавить условия однозначности, включающие в себя:

- задание геометрии рассматриваемой области и физических свойств жидкости;
- задание условий в начальный момент времени;
- задание граничных условий движения жидкости и теплообмена.

Граничные условия для скорости на твердой непроницаемой поверхности задаются исходя из предположения о прилипании жидкости к поверхности, т.е. скорость жидкости на поверхности равна нулю. Граничные условия для температуры задаются в виде условий сопряжения: $T_{ст} = T_{ж}$, $q_{ст} = q_{ж}$, где индексы «ст» и «ж» соответствуют значениям на границе со стороны стенки и жидкости соответственно. Задание граничных условий в виде сопряжения требует расчета температурного поля как в жидкости, так и в стенке, для чего необходимо решать задачу теплопроводности в стенке. На практике при решении задач конвективного теплообмена граничные условия задаются в более простом виде – так называемых граничных условий первого и второго рода.

Граничные условия первого рода состоят в задании распределения температуры на жидкости на стенке:

$$T = T_{\text{ст}}(x_{\text{ст}}, y_{\text{ст}}, z_{\text{ст}}, \tau), \quad (9.20)$$

второго – в задании распределения на стенке плотности теплового потока:

$$q = q_{\text{ст}}(x_{\text{ст}}, y_{\text{ст}}, z_{\text{ст}}, \tau). \quad (9.21)$$

Совокупность основных уравнений, начальных и граничных условий составляет математическое описание рассматриваемой задачи течения и теплообмена. Математическое описание в виде (9.19)–(9.21) справедливо как для ламинарного, так и турбулентного движения.

Турбулентные потоки отличаются гораздо более интенсивным переносом по сравнению с ламинарными, что связано с интенсивным перемешиванием жидкости в турбулентных потоках. Поэтому в большинстве технических устройств выгодно иметь турбулентный режим течения. Турбулентность – сложное физическое явление, не имеющее замкнутого математического описания. Определяя понятие турбулентного движения жидкости [3], говорят, что это такое движение, при котором в потоке существуют нерегулярные случайные пульсации скорости и давления, перемешивающие поток и обуславливающие молярный механизм взаимодействия между ее элементами, т.е. в отличие от ламинарного режима течения подчеркивается неупорядоченный характер изменения параметров потока. Неупорядоченность турбулентного движения связана с влиянием на поток некоторых не поддающихся точному учету факторов. Поэтому реализация того или иного значения параметра в турбулентном потоке носит вероятностный характер.

Все параметры турбулентного потока (скорость, температура, давление и др.) изменяются во времени. Поэтому турбулентные течения являются нестационарными. Но во многих случаях средние значения параметров не изменяются во времени, и такие течения называются квазистационарными. Для математического описания

процесса полезно выделить из рассматриваемой величины ее осредненное значение. Иными словами, можно рассматривать мгновенное значение величины φ (называемое также актуальным) в любой момент времени как сумму осредненного значения $\bar{\varphi}$ и отклонения φ' от осредненного значения:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'. \quad (9.22)$$

Величины φ' называются пульсационными составляющими или пульсациями физической величины. Например, если рассматриваются компоненты вектора скорости u_i , то u_i' представляют собой пульсационные скорости или скорости пульсационного движения вдоль соответствующего направления. В теории турбулентности для описания статистических характеристик потока пользуются величинами, называемыми моментами. Моментами первого порядка $\bar{\varphi}$ являются осредненные значения величин в данной точке потока, например, \bar{u} , \bar{T} и т.д. Средние значения пульсационных величин или центральные моменты первого порядка $\bar{\varphi}'$ равны нулю. Моментами второго порядка называются осредненные значения квадратов актуальных величин или произведения двух различных актуальных величин, взятых в одной и той же или различных точках потока. Одноточечными моментами второго порядка являются, например, осредненные значения квадратов компонент вектора скорости $\overline{u_i^2}$, которые определяют кинетическую энергию осредненного турбулентного течения вдоль координатных осей. Моментами второго порядка являются и осредненные квадраты пульсационных скоростей $\overline{(u_i')^2}$, характеризующие энергию пульсационного движения.

Изучение природы турбулентных течений показывает, что турбулентный поток представляет собой совокупность вихреподобных образований (вихрей) самого различного размера (масштаба). Как правило, подвод энергии к пульсационному дви-

жению турбулентного потока осуществляется от осредненного течения через вихри больших масштабов, размеры которых сравнимы с характерными размерами потока (при течениях в трубах таким размером является диаметр трубы). В результате действия сил инерции и разрушения больших вихрей происходит перенос энергии к вихрям все меньших размеров. По мере уменьшения размеров вихрей возрастает роль вязких сил, под действием которых кинетическая энергия турбулентного движения превращается в тепло. Таким образом, размеры наиболее крупных вихрей, наблюдаемых в турбулентном потоке, определяются характерными геометрическими размерами течения, а нижняя граница – масштаб вязкой диссипации – соответствует таким размерам вихрей, для которых преобладающую роль играют вязкие силы. Этот масштаб был определен А.Н. Колмогоровым и носит его имя:

$$\eta = (v^3/\epsilon)^{1/4},$$

где ϵ – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

Оценки, выполненные для характерных параметров турбулентного течения в охлаждающих каналах реактора ИТЭР, дают значение $\eta \sim 1 \cdot 10^{-6}$ м.

Хаотический характер изменения параметров турбулентного потока в большинстве практических случаев делает невозможным, да и нецелесообразным получение закономерностей, описывающих изменение мгновенных значений параметров. С практической точки зрения наибольший интерес представляют осредненные значения параметров турбулентного потока. Статистическая теория турбулентности базируется на том, что дифференциальные уравнения (9.16)–(9.18) применимы для описания мгновенных значений параметров турбулентных потоков. Справедливость этого положения следует из оценок, согласно которым размеры самых мелких турбулентных образований (масштаб Колмогорова) на несколько порядков превышают длину свободного пробега молекул, и, следовательно, в этом случае можно не учитывать молекулярное строение среды.

Рассмотрим наиболее простой случай турбулентного течения в круглой трубе. Для получения уравнений для осредненных параметров турбулентного течения нужно в системе (9.19) актуальные значения заменить суммой осредненного и пульсационного значений в виде (9.22) и провести осреднение этих уравнений. Данный подход и правила осреднения были предложены впервые О. Рейнольдсом. При этом очевидно, что в исходной системе (9.19) появятся дополнительные слагаемые, называемые напряжениями Рейнольдса. Система осредненных уравнений, описывающих турбулентное течение несжимаемой жидкости в круглой трубе при симметричных относительно оси полях скорости и температуры, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_r) + \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} &= 0, \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial \tau} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \bar{w}_r \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial r} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial r} - \overline{\rho u'_r u'_x} \right) \right], \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_r}{\partial \tau} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial x} + \bar{u}_r \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial r} \right) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_r}{\partial r} - \overline{\rho (u'_r)^2} \right) \right], \\ \rho c \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{u}_r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \overline{\rho c u'_r T'} \right) \right]. \end{aligned} \quad (9.23)$$

Незамкнутость системы (9.23) обусловлена тремя слагаемыми: $\overline{\rho u'_r u'_x}$, $\overline{\rho (u'_r)^2}$ и $\overline{\rho c u'_r T'}$. Для нахождения данных слагаемых требуются дополнительные гипотезы и уравнения, привлечение эмпирической информации для замыкания системы. Необходимо использовать приближение пограничного слоя, вводить понятия коэффициентов турбулентной вязкости и теплопроводности. Для практического расчета теплообмена при турбулентном течении в трубах наиболее значимым аналитическим результатом решения системы (9.23) является формула Б.С. Петухова с сотрудниками (9.6), позволяющая находить КТО с необходимой точностью.

Получить решение, не использующее эмпирическую информацию, возможно с помощью методов прямого численного решения системы (9.19) для актуальных параметров. При численном моделировании система дифференциальных уравнений заменяется дискретным аналогом, представляющим собой систему алгебраических уравнений. В настоящий момент получить решение для практически значимого случая не представляется возможным из-за ограничений по вычислительной мощности компьютеров. С учетом минимального масштаба турбулентности требуется построение очень мелкой сетки. Время расчета на такой сетке для современных кластерных систем составляет ~ 100 лет. По оценкам, достижение необходимой производительности компьютеров возможно через 50–80 лет.

В настоящий момент используются приближенные методы решения системы (9.23), основанные на использовании моделей турбулентности. Наибольшее распространение получили численные методы решения. Активно развиваясь последние 50 лет, численные методы воплотились в пакеты прикладных программ как коммерческие, так и открытые, настроенные на решение большого класса задач течения и теплообмена в турбулентном потоке. В последние годы достигнуты значительные успехи как в области построения эффективных численных алгоритмов, так и в разработке сопутствующего математического обеспечения (генераторы сеток, интерактивные системы ввода данных и системы визуализации результатов расчетов). Но проблема численного моделирования турбулентности, как и на протяжении многих предшествующих десятилетий, по-прежнему остается одной из наиболее сложных и актуальных проблем механики жидкостей. В отличие от ламинарных течений однофазной среды, расчет которых стал во многом рутинной процедурой, надежное предсказание характеристик сложных турбулентных течений является сложнейшей задачей. Вместе с тем, накопленный опыт в вычислительной гидродинамике и теплообмене, позволяет получать надежные решения в большинстве практических задач.

Рассмотрим различные подходы, применяемые для расчета турбулентных течений. На данный момент не существует универсальной модели турбулентности для широкого диапазона течений.

Выбор модели турбулентности зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и временных затрат, необходимых на процесс моделирования. Для адекватного выбора модели турбулентности необходимо четко представлять свойства и ограничения каждой модели турбулентности. В большинстве программных продуктов, так называемых CFD-кодах (вычислительная гидродинамика), пользователю предоставляется возможность выбора модели турбулентности.

Приведем сложившуюся в литературе классификацию моделей турбулентности и методов расчета.

1. Модели, использующие гипотезу Буссинеска (предполагается, по аналогии с вязкими напряжениями в ламинарных потоках, что турбулентные напряжения пропорциональны градиенту осредненной скорости).

Гипотеза базируется на рассмотрении турбулентных вихрей как частиц, подобных молекулам в кинетической теории). Классифицируются по количеству дифференциальных уравнений переноса, получаемых для моментов второго порядка:

- алгебраические модели (простейшие, не содержат дифференциальных уравнений переноса);
- модели с одним уравнением (модель Спаларта–Аллмареса);
- модели с двумя уравнениями (модели типа k – ϵ и k – ω , модель Ментера SST – комбинация k – ϵ и k – ω моделей).

2. Модели рейнольдсовых напряжений (нелинейные модели) основаны на определении связи тензора так называемых рейнольдсовых напряжений $\overline{\rho u'_i u'_j}$ и параметров осредненного течения. Решаются дополнительные уравнения с привлечением эмпирической информации. Группы моделей 1 и 2 основаны на методе осреднения уравнений Навье–Стокса и объединены в группу моделей RANS.

3. Метод моделирования крупных вихрей (LES). Идея метода заключается в том, что большие масштабы турбулентности рассчитываются явно, решением системы (9.19), а эффекты более мелких вихрей моделируются с использованием правил подсеточного замыкания. Принципиальное преимущество LES состоит в том, что

благодаря относительной однородности и изотропности мелкомасштабной турбулентности, описание ее характеристик при помощи подсеточной модели оказывается гораздо более точным, чем моделирование всего спектра турбулентных пульсаций. Естественной платой за указанные важные преимущества LES является значительное увеличение вычислительных затрат.

4. Гибридные методы. В настоящее время разрабатывается ряд промежуточных подходов, сочетающих в себе элементы RANS, LES и DNS. Большинство современных полуэмпирических моделей турбулентности очень хорошо описывают пограничный слой. Это привело к созданию различных гибридных подходов, использующих RANS около стенок и LES вдали от них.

Метод осреднения уравнений Навье–Стокса (RANS) в основном применяется в промышленности для решения инженерных задач и используется в таких моделях турбулентности, как модель Спаларта–Аллмареса, модели $k-\varepsilon$, $k-\omega$, SST-модель и модель рейнольдсовых напряжений.

Применение LES-модели в промышленных задачах крайне ограничено, что в основном связано с высокими требованиями данной модели к вычислительным ресурсам. Так, в одном из наиболее популярных коммерческих пакетов ANSYS FLUENT возможно использовать следующие модели турбулентности:

- 1) Модель Спаларта–Аллмареса;
- 2) $k-\varepsilon$ модели (стандартная модель $k-\varepsilon$, ренормализационная модель $k-\varepsilon$ "RNG $k-\varepsilon$ ", реализованная модель $k-\varepsilon$ "Realizable $k-\varepsilon$ ");
- 3) $k-\omega$ модели (стандартная модель $k-\omega$, модель $k-\omega$ с переносом касательных напряжений "SST $k-\omega$ ");
- 4) модель рейнольдсовых напряжений "RSM";
- 5) модель больших вихревых структур "LES".

Выбор в пользу той или иной модели турбулентности в пакетах выполняется на основании результатов сравнительных расчетов и сопоставления с известными и верифицированными решениями. Для задач расчета теплообмена в оборудовании ИТЭР, результаты, получаемые с применением известных программных продуктов, обладают достаточной надежностью.

9.2.3. Теплообмен при кипении

Механизм пузырькового кипения

В задачах ИТЭР кипение жидкости возможно только на твердой поверхности теплообмена, к которой подводится тепло. При кипении на твердой поверхности образование паровой фазы наблюдается в отдельных местах этой поверхности. От механизма теплоотдачи при конвекции однофазной жидкости механизм теплообмена при пузырьковом кипении отличается наличием дополнительного переноса тепла и массы вещества паровыми пузырями из пограничного слоя в поток жидкости. Для возникновения кипения на технических поверхностях необходимо наличие перегрева жидкости относительно температуры насыщения. Перегрев жидкости имеет максимальную величину непосредственно у обогреваемой поверхности теплообмена.

Кипение связано с образованием межфазной поверхности под уровнем жидкости [2]. Так как межфазная поверхность обладает избыточной свободной энергией (энергия Гельмгольца поверхности раздела), то для ее создания требуется совершение работы. Практически это значит, что такая поверхность под уровнем может возникнуть только в метастабильной (перегретой по отношению к температуре насыщения T_s на некоторую величину ΔT) жидкости.

По отношению к равновесному состоянию метастабильное состояние может быть достигнуто как изобарическим перегревом относительно температуры насыщения, так и изотермическим сбросом давления.

Первый способ осуществляется в обычно реализуемом кипении, причем в этом случае перегревается тонкий слой жидкости у обогреваемой твердой поверхности. Второй случай в технике чаще всего связан с аварийным процессом разгерметизации сосудов под давлением.

При анализе кипения важным понятием является минимальный радиус жизнеспособного пузырька пара R_* , находящегося в состоянии неустойчивого термодинамического равновесия с окружающей жидкостью (см. рис. 9.6). Если радиус пузырька

больше R_* , то пузырек растет, если меньше, то существование его невозможно, он конденсируется. Рассмотрим равновесный пузырек пара радиусом R_* в однородно перегретой жидкости, пузырек имеет минимальную поверхность – сферическую. Наличие сферической поверхности раздела фаз обуславливает превышение давления пара в пузырьке p'' относительно давления жидкости p' на величину лапласовского скачка давления: $\Delta p = p'' - p' = 2\sigma/R_*$. Перепад давления можно выразить, используя при небольших перегревах приближение $\Delta p / \Delta T \approx \left(\frac{dp}{dT}\right)_s$ или $\Delta p \approx \Delta T \left(\frac{dp}{dT}\right)_s$, где уравнение Клапейрона–Клаузиуса определяет производную $\left(\frac{dp}{dT}\right)_s = \frac{r}{T_s(v'' - v')} \approx \frac{r}{T_s v''} = \frac{r p''}{T_s}$. Используя эту подстановку в формуле Лапласа, выражаем радиус пузырька:

$$R_* = \frac{2\sigma T_s}{r p'' \Delta T}. \quad (9.24)$$

Оценки при параметрах теплоносителя в ИТЭР дают значение $R_* \approx 1 \cdot 10^{-6}$ м.

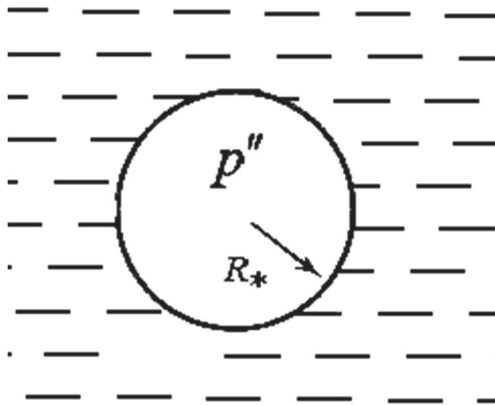


Рис. 9.6. Равновесный пузырек пара в перегретой жидкости

При кипении паровые пузырьки образуются на обогреваемой твердой стенке. Центрами парообразования служат элементы микрошероховатости стенки (впадины, царапины либо нанесенные искусственным образом каверны), обладающие пониженной локальной смачиваемостью. Увеличение перегрева стенки ведет к росту числа одновременно действующих центров парообразования, что сопровождается ростом интенсивности теплообмена.

Зарождение парового зародыша в метастабильной жидкости на твердой стенке отличается от парообразования в объеме тем, что часть новой поверхности раздела F приходится на контакт паростенка (площадь $F_{ст}$ на рис. 9.7). Изменение термодинамического потенциала (энергии Гиббса) метастабильной жидкости при возникновении на твердой стенке парового зародыша можно выразить как:

$$\Delta\Phi = V\rho''\Delta\phi + \sigma F \left(1 - \frac{F_{ст}}{F} (1 - \cos\theta) \right), \quad (9.25)$$

где θ является равновесным краевым углом смачивания (рис. 9.7), его отсчитывают в жидкую фазу.

Уравнение (9.25) позволяет понять, что наличие контакта со стенкой уменьшает величину термодинамического потенциала в сравнении с образованием пузырька в объеме жидкости. Наибольшее влияние на парообразование оказывает смачиваемость поверхности. Увеличение краевого угла (ухудшение смачиваемости) позволяет уменьшить температурный напор, соответствующий началу кипения, интенсифицировать теплоотдачу, увеличить отрывной диаметр пузырька; улучшение смачиваемости способствует притоку жидкости в зону интенсивного испарения и увеличивает критический тепловой поток.

При зарождении и росте парового пузыря на поверхности между основанием пузыря и поверхностью образуется слой перегретой жидкости (микрослой). Толщина микрослоя определяется движением жидкости на границе основания растущего пузыря.

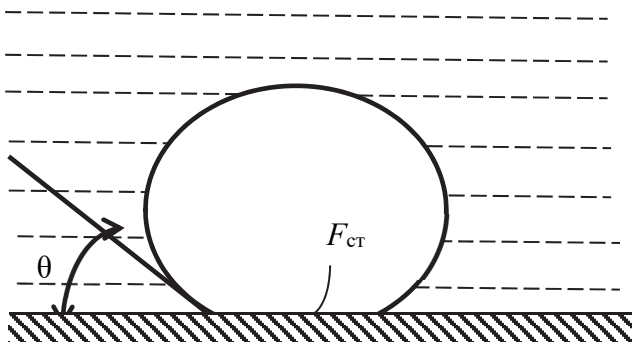


Рис. 9.7. Паровой зародыш на твердой стенке

Краткий вывод формулы В.В. Ягова для пузырькового кипения

Опытные данные, накопленные к настоящему времени, позволяют утверждать, что пузырьковое кипение определяется своими собственными, внутренними механизмами. Вслед за [2] выполним анализ теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении. Действующие центры парообразования – малые, так называемые сухие пятна на поверхности теплообмена. Характерный размер пятен соответствует радиусу жизнеспособного парового зародыша R_* (9.24). Сухие пятна образуют границы контакта трех фаз – твердой, паровой и жидкой (с качественным соблюдением масштаба паровой пузырь, растущий на сухом пятне, показан на рис. 9.8), в окрестности которых возникают локальные стоки тепла высокой интенсивности, что является определяющим признаком пузырькового кипения.

Плотность центров парообразования на стенке n_F принимается обратно пропорциональной квадрату R_* : $n_F \sim R_*^{-2}$. При равномерном распределении центров парообразования на поверхности среднее расстояние между ними $l_* = 1/\sqrt{n_F}$ (l_* составляет порядка 10^3 от R_*).

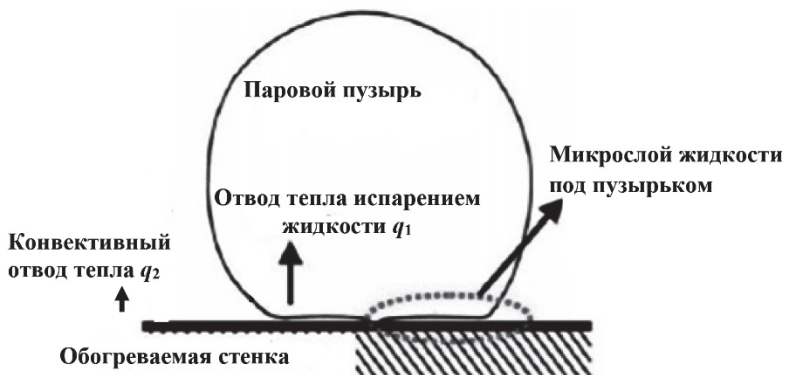


Рис. 9.8. Паровой пузырь, растущий из сухого пятна на стенке (выделенная область в увеличенном масштабе показана на рис. 9.9)

Опытные данные показывают, что суммарная площадь сухих пятен на поверхности нагрева очень мала (при тепловых потоках далеких от критических нагрузок), составляя доли и единицы процентов от общей площади теплообмена. Каждый центр парообразования с зоной интенсивного испарения (сухое пятно) можно рассматривать как точечный сток тепла высокой интенсивности. На поверхности между центрами парообразования тепло передается к жидкости конвекцией, обусловленной процессами парообразования (ростом и движением пузырей, притоком жидкости и пр.). Обозначив тепловой поток за счет испарения по границам сухих пятен как q_1 , а конвективную составляющую потока как q_2 , для результирующего теплового потока можно записать:

$$q = q_1 + q_2, \quad (9.26)$$

относя его ко всей площади поверхности кипения.

Первое слагаемое в (9.26) можно выразить через мощность стока тепла, приходящегося на одно сухое пятно $Q_{с.п.}$

$$q_1 = Q_{с.п.} n_F. \quad (9.27)$$

Для нахождения $Q_{с.п.}$ рассмотрим схему течения жидкости в окрестности сухого пятна, представленная на рис. 9.9, где показан случай, характерный для режима сросшихся пузырьков.

На расстоянии R_m от центра сухого пятна располагается зона наиболее интенсивного испарения жидкости из микрослоя под пузырьком в объем парового пузырька. Толщина пленки в зоне интенсивного испарения δ_m много меньше средней толщины пленки жидкости δ_0 , и ее термическое сопротивление за счет теплопроводности мало. Полагается, что вся приходящая в зону интенсивного испарения жидкость испаряется, так как подводится тепло от стенки. Течение жидкости в пленке обусловлено градиентом кривизны ее поверхности, из-за которого существует перепад давления, вызывающий течение жидкости к центру рассматриваемой области. Выражая массовый расход жидкости в пленке из аналогии с течением пленок жидкости под действием массовых сил и оценивая толщину пленки δ_m , получаем следующее выражение для q_1 :

$$q_1 = \text{const} \left(\frac{\lambda \Delta T_s}{R_*} \right)^{3/2} \left(\frac{v}{\sigma r} \right)^{1/2}. \quad (9.28)$$

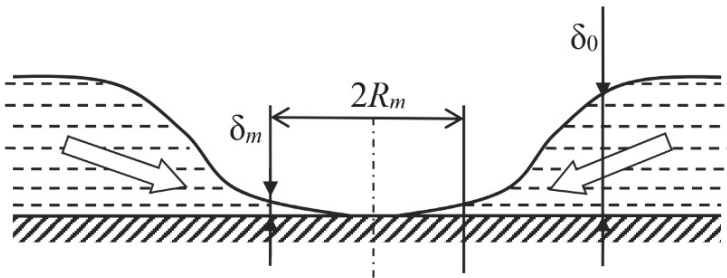


Рис. 9.9. Схема течения жидкости у границы сухого пятна

Составляющую q_2 можно представить в традиционном для однофазной конвекции виде: $q_2 = \lambda \Delta T / \delta$, где δ – эффективная толщина теплопроводящего слоя жидкости на стенке. Принимая за характерную скорость процесса среднюю скорость парообразования, а за характерный линейный масштаб расстояние l_* между центрами парообразования, толщину слоя δ можно оценить по аналогии с толщиной динамического пограничного слоя.

Окончательно для q_2 можно записать:

$$q_2 = \text{const} \cdot \lambda \Delta T_s \left(\frac{q}{\rho^* v^* R_s r} \right)^{1/2}. \quad (9.29)$$

Подставляя (9.28) и (9.29) в (9.26) и выполнив сопоставление с экспериментальными данными для подбора постоянных, получаем формулу В.В. Ягова (9.11) для пузырькового кипения в условиях свободной конвекции.

Формула (9.11) наиболее точно позволяет выполнить расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении практически любых жидкостей в широком диапазоне параметров их состояния.

Кризис теплообмена при кипении в условиях свободной конвекции

Под кризисом теплообмена первого рода понимают прекращение пузырькового режима кипения, сопровождающееся оттеснением жидкости от поверхности паром и значительным ростом температуры стенки. Сложный и недостаточно изученный характер явления кризиса теплообмена – физический механизм процесса, большое число влияющих параметров (режимных, геометрических, внешних условий и т.д.), статистическая природа явления – обуславливают тот факт, что несмотря на опубликованные в литературе большое число различных соотношений, в настоящее время не существует общепринятой модели кризиса теплообмена при кипении в условиях свободной конвекции, и тем более при вынужденном движении, позволяющей предсказать возникновение кризиса теплообмена в широком диапазоне режимных параметров.

Опубликованные экспериментальные и теоретические работы, посвященные проблемам теплообмена и кризиса теплообмена при кипении позволили раскрыть механизмы интенсивной теплоотдачи при кипении, но не дали окончательного и полного объяснения условий возникновения кризиса теплоотдачи. На настоящий момент достаточно подробно изучена структура: нагреваемая поверхность–жидкость–пар. Известно влияние на кризис параметров жидкости. Подробный обзор моделей кризиса кипения в условиях свободной конвекции выполнен в работе [5], в которой модели классифицированы на пять групп по механизму развития кризиса:

1) модель взаимодействия паровых пузырьков – пузырьки объединяются и покрывают поверхность паром;

2) модель гидродинамической неустойчивости – при интенсивном кипении пар образует струи, поднимающиеся от поверхности. При некоторой скорости пара струи распадаются в силу гидродинамической неустойчивости и пар оттесняет жидкость от нагреваемой поверхности;

3) модель высыхания микрослоя жидкости в основании пузырей – при образовании соединения пузырей (так называемый бланкет) под ним остается микрослой жидкости, кризис наступает, если слой испарится раньше отрыва пузыря от поверхности;

4) модель неконтролируемого роста сухих пятен – при исчерпании возможности отвода от стенки тепла испаряющейся в микрослой по границам сухих пятен жидкости, происходит высыхание пленки и увеличение площади сухих пятен, приводящее к кризису;

5) модель оттеснения поднимающимся паром жидкости от поверхности.

Несмотря на разнообразие предлагаемых механизмов кризиса, конечный вид формул в моделях 1–3 и 5 по внешнему виду соответствует формуле Кутателадзе (9.12), полученной в 1950 г. на основе качественных представлений о механизме процесса (ближе всего к ним модель 5) и использования методов теории подобия. Модели 1, 2 и 5 отталкиваются от уже сложившейся картины процесса, не связанной с теплообменом при кипении. С момента появления обоснования (9.12) на основе модели 2 и по настоящее время выполняется много работ, уточняющих (9.12) с помощью учета влияния контактного угла, смачиваемости и состояния поверхности и пр. Наиболее физически обоснованной является модель 4 В.В. Ягова, построенная как предел возможностей его модели теплообмена при кипении. Модель 4 В.В. Ягова приводит к формуле (9.13). Используя для расчета $q_{кр}$ для условий свободной конвекции в области умеренных и высоких приведенных давлений жидкости ($p/p_{кр} > 0,05$) формулы (9.12) или (9.13), можно выполнить достоверную оценку значений.

Гидродинамика вынужденных двухфазных потоков

В условиях кипения воды в каналах охлаждения элементов термоядерных реакторов и установок происходит движение двухфазного потока. Двухфазные потоки характеризуются следующими параметрами.

Расходное массовое паросодержание определяется отношением массового расхода пара $G_{\text{п}}$ (кг/с) к массовому расходу смеси G :

$$x = G_{\text{п}}/G.$$

Массовый расход смеси определяется расходами паровой фазы и жидкой $G_{\text{ж}}$:

$$G = G_{\text{п}} + G_{\text{ж}}.$$

Расходное объемное паросодержание определяется как:

$$\beta = V_{\text{п}}/V,$$

где $V_{\text{п}}$ – объемный расход пара; V – объемный расход смеси, определяемый расходом фаз $V = V_{\text{п}} + V_{\text{ж}}$; $V_{\text{ж}}$ – объемный расход жидкости. Связь объемного и массового расхода фаз: $V_{\text{п}} = G_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}$, и $V_{\text{ж}} = G_{\text{ж}}/\rho$. Используя связь объемного и массового расхода фаз, можно получить соотношения между объемным и массовым паросодержанием:

$$\frac{x}{1-x} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho} \frac{\beta}{1-\beta}.$$

Величины x и β изменяются от 0 до 1. Соотношение между величинами определяет отношение плотности пара и жидкости. При малых относительных давлениях даже небольшой величине x могут соответствовать значения β , близкие к 1.

В равновесных парожидкостных потоках энтальпия смеси может быть выражена через массовое паросодержание:

$$h_{\text{см}} = h''_s x + h'_s (1-x),$$

где h''_s и h'_s – энтальпии пара и жидкости на линии насыщения.

Принимая во внимание, что $r = h''_s - h'_s$, можно записать последнее выражение как:

$$x_g = (h_{\text{см}} - h'_s) / r. \quad (9.30)$$

Величина x_6 в (9.30) называется балансовым паросодержанием, так как $h_{см}$ находится из теплового баланса и представляет собой относительную энтальпию потока. Для термически неравновесных потоков x_6 не характеризует действительный состав смеси, хотя для многих практических задач принимают $x \approx x_6$. При кипении в потоке недогретой до температуры насыщения жидкости x_6 принимает отрицательные значения, так как ($h_{см} < h'_s$).

В экспериментах паросодержание определяют по соотношению площади сечения, занятого паром S_p , к площади всего сечения S . Отношение $\varphi = S_p/S$ называют истинным объемным паросодержанием. Задача определения φ является одной из ключевых при исследовании двухфазных потоков. В общем случае скорости движения пара и жидкости могут отличаться, в этом случае говорят об относительном скольжении фаз. При движении двухфазного потока в обогреваемом канале возрастает доля пара, для выполнения условия неразрывности увеличивается скорость движения паровой фазы, в этом случае говорят об ускорении потока. Скорость движения смеси это отношение объемного расхода смеси к площади сечения канала: $w_{см} = V/S$. Скоростью циркуляции (или приведенная скорость смеси) называют отношение массового расхода смеси к произведению плотности жидкости на площадь сечения $w_0 = G/(\rho S)$ – реальная скорость однофазной жидкости на входе в обогреваемый канал. Используют и понятие массовой скорости смеси: $\rho w_0 = G/S$. Скорость смеси связана со скоростью циркуляции выражением:

$$w_{см} = w_0 / (1 - \beta(\rho - \rho_p) / \rho). \quad (9.31)$$

Расходную плотность смеси определяют как:

$$\rho_{см} = \beta \rho_p + (1 - \beta) \rho. \quad (9.32)$$

Для описания механики двухфазного потока к каждой из фаз возможно применение уравнений (9.16)–(9.18), на межфазных поверхностях выполняются условия совместности, определяющие взаимодействие фаз на границе раздела. В общем случае при течении двухфазных потоков в зависимости от количественного соотношения пара и жидкости могут реализовываться различные режимы течения:

отдельные пузырьки пара в потоке жидкости, паровые «снаряды», разнообразные дисперсные режимы и режимы с разделением фаз. Положение и форма границы в двухфазных системах не могут быть определены заранее и зависят от многих параметров, что существенно затрудняет возможность численного решения задач механики двухфазных систем. В задачах определения потерь давления в каналах при течении двухфазных потоков основываются на модельных представлениях. Простейшей моделью двухфазного потока является гомогенная, состоящая в замене реальной среды некоторой модельной с эффективными свойствами (плотностью и вязкостью смеси) и параметрами (температура, давление, скорость). Для этой среды применяют методы, отработанные на однофазных потоках. Модель дает хорошие результаты, когда реальная среда близка к гомогенной: фазы однородно перемешаны и мелко диспергированы. Подобные условия достигаются наиболее просто при высоких приведенных давлениях и скоростях течения. Если модель гомогенной среды не удовлетворяет реальному течению, используют модели раздельного течения. В этих моделях есть четкая граница раздела фаз, например, кольцевое течение в вертикальной трубе. В инженерной практике часто используются эмпирические методики, позволяющие не задумываться о модели течения и проводить расчеты для всего возможного диапазона паросодержания потока, например, методика Локкарта и Мартинелли [6]. Методика связывает градиент давления и истинное объемное паросодержание двухфазного потока с градиентами давления однофазных потоков жидкости и пара при их течении с реальными расходами в том же канале. Методика не имеет физического содержания, но дает приемлемое соответствие с опытом, обеспечивающееся подбором эмпирических коэффициентов для конкретных условий.

Для условий гидродинамики в термоядерных реакторах и установках рассмотрим применение гомогенной модели – самой простой из предложенных, и наиболее точно соответствующей реальной картине течения в докритических режимах. Традиционная гомогенная модель использует гидравлическое приближение, при этом о скольжении фаз говорить бессмысленно, отсутствует понятие

истинного объемного паросодержания, т.е. $\phi \equiv \beta$. Для гидродинамически стабилизированного двухфазного потока, обусловленный потерями на трение градиент давления записывается так же, как в однофазном течении:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right) = \frac{4\tau_{\text{см}}}{d_{\Gamma}}, \quad (9.33)$$

где $\tau_{\text{см}}$ – касательное напряжение на стенке при течении двухфазной смеси, d – гидравлический диаметр канала.

Используя (9.33), рассчитывают потери давления на единицу длины канала. Для определения $\tau_{\text{см}}$ применяют выражение для однофазного потока, в котором используются параметры смеси (9.31), (9.32):

$$\tau_{\text{см}} = \frac{\xi_{\text{см}}}{8} \rho_{\text{см}} w_{\text{см}}^2. \quad (9.34)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления $\xi_{\text{см}}$ рассчитывается по формулам для однофазных течений, например (9.7). Для определения $\xi_{\text{см}}$ необходимо рассчитать число Рейнольдса смеси:

$$\text{Re}_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{см}} w_{\text{см}} d_{\Gamma}}{\mu_{\text{см}}}. \quad (9.35)$$

В выражении (9.35) $\rho_{\text{см}} w_{\text{см}} = \rho w_0$, в чем легко убедиться подстановкой значений. Основная сложность связана с расчетом динамической вязкости смеси, для которого существуют различные эмпирические подходы. Для течения в охлаждающих каналах термоядерных реакторов и установок можно принять, что в условиях сохранения на стенке жидкости вязкость смеси равна вязкости жидкости. Таким образом, расчет по (9.35) дает значения, совпадающие с числом Рейнольдса для однофазного потока жидкости. Коэффициент гидравлического сопротивления смеси в предложенной гомогенной модели совпадает со значением, отвечающим течению однофазной жидкости.

В реальном двухфазном потоке, например, в парогенераторах электростанций, присутствуют неоднородности локального паросодержания и гомогенная модель требует уточнения. Подробно методы расчета двухфазных потоков изложены в [7, 8].

Теплообмен и кризис при кипении в вынужденном потоке

Кипение при свободной конвекции является классическим примером решения задачи, имеющей много приложений, выходящих за границы ее постановки. В реальном теплообменном оборудовании кипение потока происходит, как правило, в условиях вынужденной конвекции. В задачах ИТЭР параметры потока таковы, что влияние на результирующую теплоотдачу механизмов кипения и вынужденной конвекции сопоставимо. Можно утверждать, что основным механизмом пузырькового кипения (испарение по границам сухих пятен) реализуется и в условиях вынужденной конвекции. Тогда расчет теплоотдачи необходимо выполнять при учете, как вынужденного движения теплоносителя, так и кипения. Обычно используют интерполяцию этих механизмов, как линейную, так и квадратичную или кубическую. Так, например, Д.А. Лабунцов в области кипения с малым паросодержанием рекомендует использовать простые интерполяционные формулы:

$$\alpha = \alpha_{\text{кип}}, \text{ если } \alpha_{\text{кип}} \geq 2\alpha_{\text{кон}}; \quad \alpha = \alpha_{\text{кон}}, \text{ если } \alpha_{\text{кон}} \geq 2\alpha_{\text{кип}};$$

$$\alpha = \alpha_{\text{конв}} \frac{4\alpha_{\text{кон}} + \alpha_{\text{кип}}}{5\alpha_{\text{кон}} - \alpha_{\text{кип}}}, \text{ если } 0,5\alpha_{\text{кон}} < \alpha_{\text{кип}} < 2\alpha_{\text{кон}}.$$

С.С. Кутателадзе предложил следующую интерполяционную формулу, в которой n чаще всего принимают равным 2 или 3. Использование формулы подобного вида позволяет усилить влияние доминирующего эффекта:

$$\alpha = \sqrt[n]{\alpha_{\text{кон}}^n + \alpha_{\text{кип}}^n}. \quad (9.36)$$

В работе [9], с целью учета влияния недогрева на теплоотдачу предложено следующее соотношение:

$$\alpha = \left[\alpha_{\text{кип}}^n + \alpha_{\text{конв}}^n \left(1 + \frac{\Delta T_{\text{н}}}{\Delta T_{\text{с}}} \right)^n \right]^{1/n}, \quad (9.37)$$

при этом отмечается, что лучшее согласие с большинством опытных данных наблюдается при $n = 3$, однако экспериментальные данные при относительно высоких скоростях и недогревах потока лежат выше расчетных.

В работе [10] предложен более сложный интерполяционный механизм:

$$\alpha = E\alpha_{\text{кон}} + S\alpha_{\text{кип}} \quad (9.38)$$

где:

$$\alpha_{\text{кон}} = 0,023\text{Re}^{0,8}\text{Pr}^{0,4} \lambda / d,$$

$$\alpha_{\text{кип}} = 0,00122 \left(\frac{\lambda^{0,79} c_p^{0,45} \rho^{0,49}}{\sigma^{0,5} \mu^{0,29} \Gamma^{0,24} \rho_{\text{п}}^{0,24}} \right) \Delta T_s^{0,24} \Delta p_s^{0,75},$$

$$E = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq 0,1 \\ 2,35 \left(\frac{1}{x} + 0,213 \right)^{0,736}, & \text{если } x > 0,1 \end{cases},$$

$$X = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{п}}} \right)^{0,1},$$

$$S = \frac{1}{1+2,35 \cdot 10^{-6} \text{Re}^{1,17}},$$

где E – коэффициент, учитывающий увеличение вклада конвекции за счет увеличения скорости жидкости на стенке трубы в результате образования пузырей; S – коэффициент, учитывающий влияние скорости потока на механизм кипения; в формуле для расчета $\alpha_{\text{кип}}$ приращение давления Δp_s соответствует температурному напору ΔT_s .

Методы (9.36) – (9.38) предложены достаточно давно. В большинстве современных работ используются методы, подобные (9.38) с уточнением расчета отдельных сомножителей. Изложение подходов, применяемых в термоядерных реакторах и установках, приведено далее.

Для нахождения $q_{\text{кр}}$, соответствующих кризису теплообмена при кипении в вынужденном потоке, необходимо понимать, что нет универсальной методики, позволяющей найти значения $q_{\text{кр}}$ во всем возможном диапазоне относительных энтальпий потока, определяемых по (9.30). Единственным универсальным средством для оценки $q_{\text{кр}}$ являются «скелетные» таблицы КТП для воды [11], построенные на результате осреднения и обобщения массивов наиболее надежных опытных данных. Таблицы позволяют выбрать значение $q_{\text{кр}}$ в зависимости от давления, массовой скорости и относительной энтальпии потока. При необходимости значения могут быть пересчитаны на другие диаметры и другие жидкости с использованием методов подобия.

Рассмотрим качественную зависимость $q_{кр}$ (рис. 9.10) от относительной энтальпии потока в месте кризиса, для каналов, охлаждаемых потоком жидкости, температуру которой на входе можно изменять.

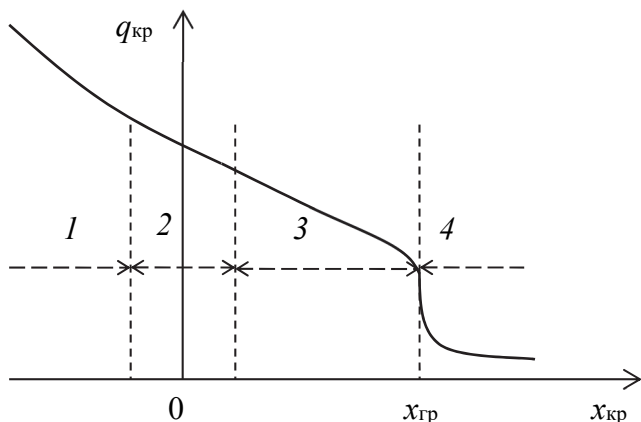


Рис. 9.10. Качественная зависимость $q_{кр}$ от относительной энтальпии потока

По влиянию на закономерности $q_{кр}$ можно выделить четыре характерные области относительных энтальпий: 1 – сильно недогретая до температуры насыщения жидкость ($x < -0,1$); 2 – околонулевые значения относительных энтальпий ($-0,1 < x < 0,1$); 3 – насыщенная жидкость в различных режимах течения, это участок заканчивается достижением так называемого граничного паросодержания $x_{гр}$, соответствующего высыханию жидкой пленки на стенке в дисперсно-кольцевом режиме течения; 4 – область так называемого кризиса второго рода, при котором плотность теплового потока не является определяющим параметром, полное высыхание пленки на стенке происходит при паросодержаниях, больших чем граничные, высыхание определяется выпадением капель жидкости из ядра потока на стенку. Значения $q_{кр}$ при кипении в потоке определяет не только паросодержание, но и другие параметры, прежде всего скорость потока.

Условиям теплообмена в термоядерных реакторах и установках отвечает в наибольшей степени область 1, соответствующая кипению в потоке сильно недогретой жидкости. Механизм кризиса теплообмена и уравнения для расчета представлены далее. Области 2 и 3 соответствуют кризису пузырькового кипения, для оценки значений $q_{кр}$ в этих областях наиболее надежно использовать таблицы данных [11].

9.3. Расчет потерь давления, КТО И КТП в оборудовании ИТЭР

Отличительными особенностями теплообмена в термоядерных реакторах и установках являются использование интенсификации теплообмена в виде закрутки потока, сильный недогрев теплоносителя до температуры насыщения и односторонний нагрев. Далее рассматриваются турбулентная вынужденная конвекция и потери давления в однофазном закрученном потоке, кипение и кризис теплообмена при кипении в сильно недогретом потоке.

9.3.1 Расчет потерь давления в закрученном потоке при одностороннем нагреве

Гидравлическое сопротивление в изотермических условиях

Для незакрученного потока коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывается на основании опытных данных по соотношению (9.8). При рассмотрении закрученных потоков, чтобы отразить в явном виде влияние шага скрученной ленты на коэффициент гидравлического сопротивления, обычно в формуле (9.8) используется осевая скорость на входе в трубу с лентой и длина трубы в качестве l . Проводится анализ полученных данных, и коэффициенты гидравлического сопротивления обобщаются зависимостями, построенными путем введения поправки к формуле (9.8), учитывающей коэффициент закрутки.

Течение закрученного потока осуществляется по траектории, соответствующей винтовой линии (рис. 9.11).

На рисунке 9.11 показаны составляющие вектора \vec{w}_* результирующей скорости потока: тангенциальная v и осевая w .

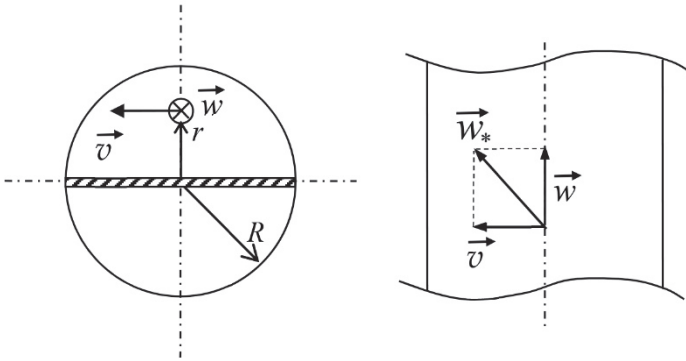


Рис. 9.11. Составляющие вектора скорости в закрученном потоке

Течение закрученного потока осуществляется по винтовому каналу длиной большей длины трубы и со скоростью, превосходящей осевую. Результаты экспериментальных исследований показывают, что в закрученном потоке поле скоростей соответствует вынужденному (квazitвердому) вращению со скоростью $v = 2\pi r \bar{w} / t = k2r \bar{w} / d$, наложенному на практически равномерное осевое течение. Согласно опытным данным осевая скорость w соответствует среднему значению \bar{w} в пределах погрешности измерений 5÷7%. Радиальной составляющей скорости в сравнении с осевой и тангенциальной можно пренебречь.

Результирующая средняя скорость на внешней границе пограничного слоя трубы (при $r \approx R$) равна:

$$w_* = \sqrt{v_m^2 + w^2} = \sqrt{(kw)^2 + w^2} = w\sqrt{1+k^2}. \quad (9.39)$$

Скорость на внешней границе пограничного слоя на ленте, без учета вторичных течений, изменяется от w (при $r \approx 0$) до w_* (при $r \approx R$). Средняя скорость на границе пограничного слоя на ленте будет также близка к w_* . Так как потери давления в основном определяются трением на поверхности винтового канала, а толщина

вязкого подслоя при развитом турбулентном течении значительно меньше диаметра трубы, то за эффективную скорость потока разумно принять скорость w_* , определяемую выражением (9.39). Тогда эффективную длину винтового канала можно выразить аналогично: $l_* = l(1 + k^2)^{0,5}$.

Коэффициент гидравлического сопротивления для закрученного потока определяется через «спрямленные» значения скорости и длины как:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho w_*^2} \frac{d_r}{l_*} = \frac{2\Delta p}{\rho w^2} \frac{d_r}{l} \frac{1}{(1+k^2)^{3/2}}. \quad (9.40)$$

Число Рейнольдса для закрученного потока должно рассчитываться также с учетом эффективной скорости потока:

$$\text{Re}_* = \frac{w_* d_r}{\nu}. \quad (9.41)$$

Для расчета потерь давления в закрученном потоке в диапазоне, где осуществлена проверка экспериментальными данными ($k = 0 \div 0,9$, $\text{Re} = 5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^5$), можно рекомендовать формулу (9.40), представленную в виде:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2} \frac{l}{d_r} (1 + k^2)^{3/2}, \quad (9.42)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления для гладкой трубы (определяемый, например, по формуле Г.К. Филоненко (9.7) с учетом числа Re_* по (9.41)).

Примером сопоставления расчета по (9.42) с опытными данными о потерях давления в закрученном потоке является рис. 9.12. Точки на рис. 9.12 показывают результаты измерений потерь давления [12] в гладкой трубе и трубе со вставленной скрученной лентой. Опытные данные (рис. 9.12) получены в трубе с внутренним диаметром 10 мм, при длине рабочего участка 474 мм, температуре 20°C и представлены в виде потерь давления на единицу длины

в зависимости от осевой скорости потока воды. Соответствие опытных данных [12] с расчетом по (9.42), как видно из рис. 9.12, вполне удовлетворительное.

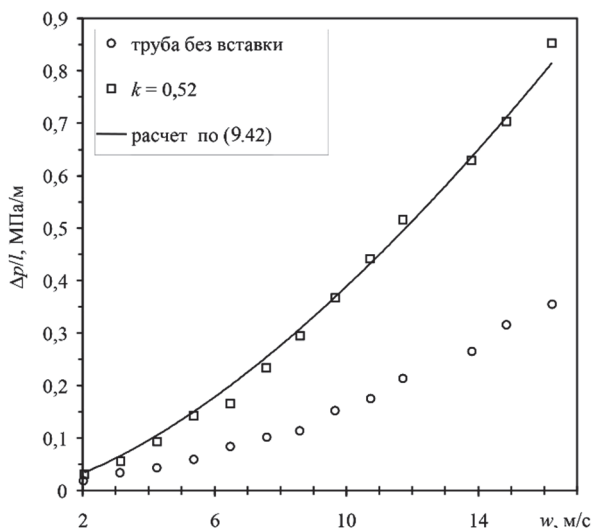


Рис. 9.12. Сопоставление расчета по (9.42) данными [12]

Гидравлическое сопротивление в условиях одностороннего нагрева

Опытные данные о потерях давления в закрученном потоке в условиях одностороннего нагрева представлены в [1]. Стенки канала, по которому движется жидкость, образуют половина внутреннего нагреваемого периметра трубы и холодная лента. Основные закономерности зависимости $\Delta p(T_{ст})$ в сравнении с прямым потоком могут проявляться слабее с учетом того, что соотношение «горячей» и «холодной» частей внутреннего периметра канала составляет $\pi/2$. В области однофазного теплообмена потери давления уменьшаются при увеличении температуры стенки из-за уменьшения вязкости жидкости в пристенном слое. В дальнейшем уменьшение потерь давления, вызванное изменением вязкости

жидкости, становится не столь заметным при приближении температуры стенки к температуре насыщения воды, в силу меньшей зависимости вязкости воды от температуры в этом интервале. Для области, где начинается кипение, потери давления практически не изменяются с ростом температуры, и гидравлическое сопротивление определяется только скоростью течения и вязкостью в пограничном слое. Объяснить подобное поведение зависимости Δp ($T_{ст}$) можно тем, что значение температуры жидкости на границе вязкого подслоя несильно отличается от температуры насыщения, а имеющиеся на стенке паровые пузырьки не выходят за границы вязкого подслоя. Начинающийся рост потерь давления при $T_{ст} \approx 300^\circ\text{C}$ связан с появлением паровой пленки в окрестности лобовой точки. Для расчета потерь давления в условиях одностороннего нагрева возможно применение методики (9.42). Особенность заключается в расчете числа Рейнольдса (9.41), в которое непосредственно входит вязкость жидкости, сильно зависящая от температуры теплоносителя. В условиях одностороннего нагрева в условиях ИТЭР отношение вязкости жидкости при температуре скрученной ленты (которая мало отличается от температуры ядра потока) к вязкости при температуре лобовой точки внутреннего периметра трубы может достигать значений $5 \div 7$. В этом случае обычно вводимая поправка на неизотермичность течения в виде отношения вязкостей использоваться не может и вряд ли отражает физику процесса. Изменение вязкости по периметру канала необходимо учитывать соответствующим выбором температуры отнесения. Определение температуры отнесения основано на осреднении температуры внутреннего полупериметра винтового канала. Если средняя температура стенки трубы T_o , а температура скрученной ленты равна среднemasсовой температуре жидкости $T_ж$, то в соответствии с долями внутреннего периметра средняя температура стенки будет $T_c = (\pi T_o + 2T_ж)/(\pi + 2)$. Таким образом, вязкость жидкости следует определять по средней температуре пограничного слоя:

$$T_{отн} = (T_c + T_ж)/2 = 0,31T_o + 0,69T_ж. \quad (9.43)$$

Для прямого потока $T_c = T_0$. Для условий одностороннего нагрева провести осреднение температуры стенки трубы в общем случае достаточно затруднительно. Распределение температуры по внутреннему периметру трубы зависит от плотности подводящего потока, вида сечения (соотношение ширины мишени и внутреннего диаметра канала оказывает сильное влияние на характер температурного поля мишени) и ряда других факторов. Осреднение температуры стенки трубы возможно на основании распределения температуры, получаемого из численного решения краевой задачи теплопроводности. В первом приближении можно принять значение T_0 равное температуре в лобовой точке внутреннего периметра трубы. При увеличении потерь давления, связанных с наличием паровых образований, для расчета потерь давления должны быть использованы методики, учитывающие двухфазность потока [2].

9.3.2. Расчет теплообмена в закрученном потоке при одностороннем нагреве

Вынужденная однофазная конвекция

В закрученном потоке рост скорости может быть учтен увеличение реальной скорости потока, учитываемый введением Re^* (9.41) в (9.6). Сопоставление опытных данных с расчетом по формуле (9.6) показывает занижение расчетных значений и расслоение данных по коэффициентам закрутки. Простое объяснение расслоения данных по коэффициентам закрутки обусловлено действием массовых сил, сообщающих потоку нормальные ускорения, достигающие для представляемых опытных данных значений 2000g. В опытах с нагревом, существующий в пределах теплового пограничного слоя градиент плотности жидкости совпадает по направлению с нормальным ускорением. В этом случае ситуация подобна той, что складывается над нагреваемой в жидкости пластиной в поле силы тяжести. Этот механизм теплообмена, подобный свободной конвекции, получил название «центробежная» конвекция. Как показали выполненные оценки, в условиях ИТЭР характерная скорость «центробежной» конвекции сопоставима со скоростью основного течения.

Для обобщения опытных данных о теплообмене при однофазной конвекции в [1] предложен подход, аналогичный [13] и основанный на учете двух независимых механизмов теплообмена – вынужденной однофазной конвекции и «центробежной» конвекции:

$$q_{\text{конв}} = q_e + q_{\text{ц}}.$$

Учитывая, что для обоих механизмов теплообмена определяющей разностью температур является $(T_o - T_{\text{ж}})$, и при выборе одного определяющего размера, выражение для расчета числа Nu в закрученном потоке можно представить в виде:

$$\text{Nu}_{\text{конв}} = \text{Nu}_{\text{в}} \left(1 + \frac{\text{Nu}_{\text{ц}}}{\text{Nu}_{\text{в}}} \right). \quad (9.44)$$

Число $\text{Nu}_{\text{в}}$ для вынужденной конвекции рассчитывается по формуле (9.6), для учета закрутки потока в (9.6) используется число Re^* (9.41), также как и для расчета ξ .

Число Нуссельта для центробежной конвекции:

$$\text{Nu}_{\text{ц}} = 0,20 \left[(\text{Re}k)^2 \left(\frac{d_r}{d} \right) \beta \Delta T_c \text{Pr} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (9.45)$$

где β – коэффициент объемного расширения жидкости, $\Delta T_c = T_o - T_{\text{ж}}$.

На рисунки 9.13 представлен пример сопоставления экспериментальных данных с расчетом по (9.44) и показаны вклады составляющих $\text{Nu}_{\text{ц}}$ и $\text{Nu}_{\text{в}}$. Как видно из рис. 9.13, при фиксированном Re^* значение $\text{Nu}_{\text{в}}$ одинаково, а различия в экспериментальных значениях объясняются разным вкладом $\text{Nu}_{\text{ц}}$. С увеличением числа Re^* относительный вклад центробежного механизма теплоотвода снижается. Соответствие опытных данных с расчетом по (9.44) можно признать хорошим.

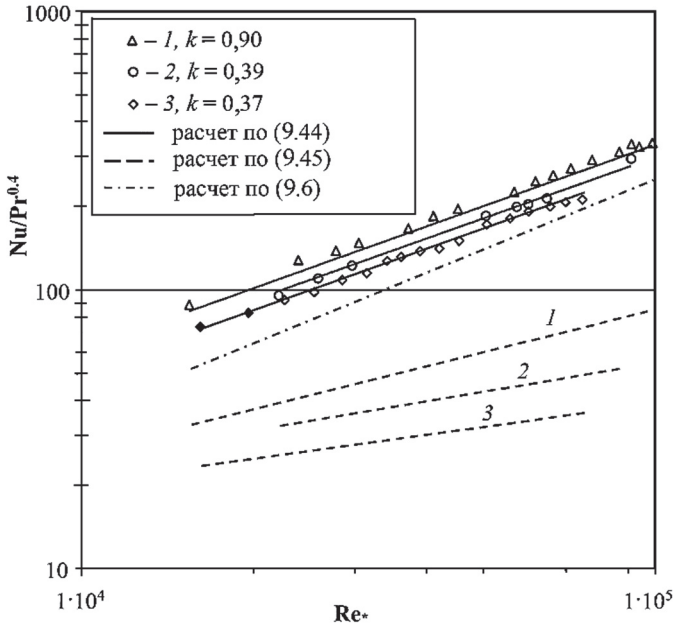


Рис. 9.13. Сравнение экспериментальных данных [1] с расчетом

Пузырьковое кипение

С практической точки зрения пузырьковое кипение интересно, прежде всего тем, что оно сопровождается наиболее интенсивным теплосъемом. Изучение этого процесса в условиях одностороннего высокоинтенсивного обогрева представляет несомненный теоретический интерес, поскольку образование парового пузырька и его существование в пристеночном слое происходят в условиях значительных, даже в пределах размеров самого пузырька, градиентов температуры по периметру канала. Так, в условиях одностороннего нагрева азимутальные температурные градиенты могут достигать до $2 \cdot 10^4$ К/м, что приводит к изменению температуры на расстояниях, сравнимых с размерами самого парового пузырька. Этот факт, а также ему сопутствующие – большие градиенты свойств жидкости и, прежде всего, градиент вязкости, могут накладывать существенную специфику на механизм кипения в данных

условиях. Кроме того, в закрученном потоке действуют интенсивные массовые силы, и их возможное влияние на теплообмен при кипении требует отдельного изучения. Рассмотрение выполненных исследований теплообмена [1] при кипении закрученного потока в условиях одностороннего нагрева позволяют сделать следующие выводы:

- вынужденная конвекция оказывает сильное влияние на характеристики теплообмена при кипении недогретого теплоносителя. Это влияние становится определяющим при высоких массовых скоростях;

- условия теплообмена в прямом и закрученном потоках качественно одинаковы, интенсификация теплообмена при одинаковых параметрах воды на входе связана главным образом с увеличением действительной скорости потока, хотя дополнительное влияние массовых сил на теплоотдачу также наблюдается;

- при относительно невысоких массовых скоростях (до 2200 кг/(м²·с)) реализуются режимы теплообмена с преобладающим влиянием механизмов пузырькового кипения, когда коэффициент теплоотдачи практически не зависит ни от скорости течения, ни от коэффициента закрутки потока.

Важным экспериментальным результатом является вывод о том, что независимо от коэффициента закрутки при массовой скорости $\rho w > 1000$ кг/(м²·с) не наблюдается роста потерь давления с увеличением плотности теплового потока. Это значит, что появляющиеся при начале кипения на стенке пузырьки пара «сидят» на стенке в пределах вязкого подслоя. Оценки толщины вязкого подслоя по формуле $y_b = \frac{11,7\nu}{w\sqrt{\xi/8}}$ и размеров жизнеспособного пу-

зырька по формуле $R_* = \frac{2\sigma T_s}{\rho_{\text{п}} r \Delta T_s}$ показывают, что даже при самых

неблагоприятных в опытах условиях больших скоростей и малых перегревов стенки значения y_b , как минимум на порядок превосходят R_* , что подтверждает возможность существования пузырьков пара в пределах вязкого подслоя. Тогда, наиболее реалистичная модель теплообмена представляется следующей: передача тепла от

стенки осуществляется за счет испарения жидкости в основании пузырька и конденсации в вершине, с последующим отводом тепла в ядро потока за счет вынужденной конвекции. На поверхности стенки, не занятой паровыми пузырьками, реализуется конвективный теплоотвод. Принимая во внимание малые размеры оснований пузырьков, недостаток опытной информации о числе активных центров парообразования на стенке, в этих условиях, по-видимому, единственно реализуемый подход – пренебречь площадью поверхности контакта пар–стенка в сравнении с площадью стенки. В подобных условиях можно утверждать о практической независимости одновременности действия механизмов теплопереноса однофазной конвекцией и испарением. Расчетное соотношение для теплообмена при пузырьковом кипении в закрученном потоке построено на учете механизмов теплоотвода от стенки за счет однофазной конвекции и кипения в виде:

$$q = q_{\text{кон}} + q_{\text{кип}}. \quad (9.46)$$

При этом принимается, что конвективный теплообмен действует так же, как в однофазном турбулентном потоке:

$$q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{кон}}(T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}), \quad (9.47)$$

где $\alpha_{\text{кон}}$ рассчитывается по (9.44).

Наибольшие сложности связаны с выбором уравнения для расчета составляющей плотности теплового потока за счет кипения $q_{\text{кип}}$. В рассматриваемом случае вклад составляющей кипения в полный тепловой поток, отводимый от стенки, обусловлен испарением жидкости внутри парового пузырька по границе сухого пятна. Наиболее проработанное уравнение для расчета теплового потока за счет испарения по границе сухого пятна, полученное на основе физических подходов и результатов опытных и численных исследований, представлено в [2]. Чтобы избежать введения эмпирических поправок на влияние давления и сохранить единый вид слагаемого $q_{\text{кип}}$ в (9.46), для его расчета было использовано соотношение В.В. Ягова – уравнение (9.11). В (9.11) значение эмпирической

постоянной $3,43 \cdot 10^{-4}$ подбирались из условия согласования с массивом данных по кипению в большом объеме. Естественно, что значение этой постоянной при обобщении данных о кипении в сильно недогретом потоке необходимо уменьшить, ведь минимальные перегревы стенки, характеризующие начало кипения в условиях опытов, являются критическими при кипении в большом объеме. Кроме того, в (9.11) было опущено слагаемое, учитывающее поправку на форму кривой насыщения. Скорректированное значение эмпирической постоянной в (9.11), равное $0,47 \cdot 10^{-4}$, было выбрано из условия согласования расчета по (9.46) с опытными данными [1]. Выражение для расчета плотности теплового потока за счет кипения в (9.46) имеет вид:

$$q_{\text{кип}} = 0,47 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda^2 \Delta T_s^3}{\nu \sigma T_s} \left(1 + \sqrt{1 + 800B} + 400B \right), \quad (9.48)$$

$$\text{где } B = \frac{r}{\sigma} \left(\frac{(\nu \rho_{\text{п}})^3}{\lambda T_s} \right)^{0,5}.$$

Сопоставление расчета по (9.46)–(8.48) проведено с известными немногочисленными опытными данными о теплообмене при кипении в недогретом потоке. Для условий одностороннего нагрева удалось воспользоваться данными [12], полученными для трубы без ленты, при $p = 1$ МПа, скорости потока воды $w = 15,8$ м/с, $T_{\text{вх}} = 20 \div 80^\circ\text{C}$, $d = 10$ мм. Данные о теплообмене при кипении воды в равномерно нагреваемых трубах с лентой при $k = 0,45$, $p_{\text{вых}} = 0,6$ МПа, $T_{\text{ж.ср}} = 60 \div 100^\circ\text{C}$, $d = 6$ мм представлены в [14]. Для проверки работоспособности расчетной методики для других жидкостей были использованы данные [15] о теплообмене при кипении в сильно недогретом прямом потоке хладона R113 в трубе диаметром $d = 1,2$ мм при равномерном нагреве и высоких массовых скоростях течения. Для данных [15] характерно сильное влияние вынужденной конвекции на теплообмен. Анализ данных показывает, что при высоких приведенных давлениях в условиях опытов [15] более чем 80% полного теплового потока может быть воспринято за счет вынужденной конвекции. Данные [15] получены в диапазоне $p = 0,44 \div 1,55$ МПа,

$\rho w = 28300 \div 45000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $T_{\text{вх}} = 15 \div 21^\circ\text{С}$. На рисунке 9.14 представлено сравнение перечисленных опытных данных о теплообмене при кипении в недогретом потоке с расчетом по (9.46)–(9.48).

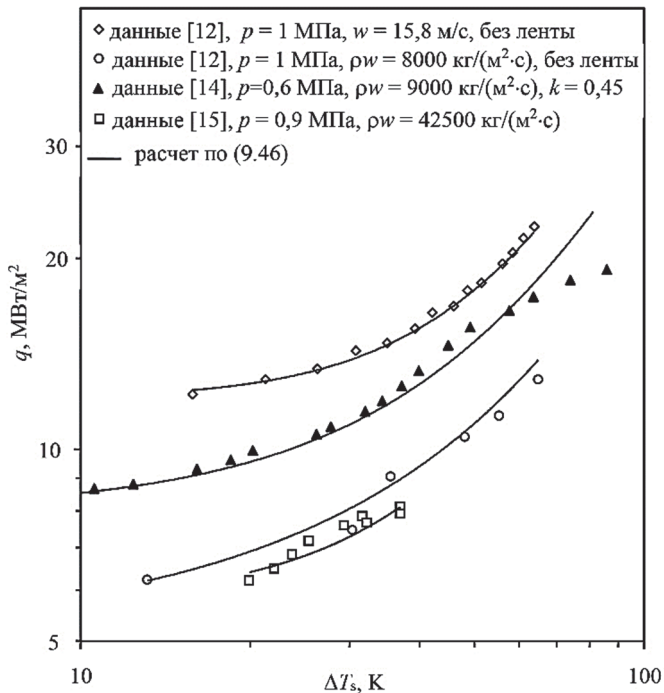


Рис. 9.14. Сравнение опытных данных о теплообмене при кипении в недогретом потоке воды с расчетом по (9.46)

Можно отметить универсальность разработанной расчетной методики, с ее использованием удовлетворительно обобщены опытные данные (всего 800 точек), в том числе как для условий равномерного, так и одностороннего нагрева, в прямом и закрученном потоке разных жидкостей [1]. Методика апробирована в диапазоне параметров потока: $p = 0,44 \div 2,0 \text{ МПа}$, $\rho w = 350 \div 45000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $x < -0,2$, $k = 0 \div 0,9$.

9.3.3. Критические тепловые потоки при кипении

Традиционно под кризисом теплообмена понимают переход от пузырькового к пленочному режиму кипения, сопровождающийся заметным ростом температуры стенки вследствие уменьшения эффективности теплообмена. Как правило, в результате наступления кризиса происходит механическое разрушение рабочего участка, пережог. Исследования показали, что при одностороннем нагреве в условиях охлаждения сильно недогретым закрученным потоком переход к пленочному режиму кипения в окрестности лобовой точки не сопровождается резким необратимым ростом температуры стенки. Особенности, характерные и присущие теплообмену к закрученному потоку в условиях одностороннего нагрева (приводящего к сильной неизотермичности внутренней стенки), проявляются при массовой скорости потока $\rho w > 2250 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [1]. Сочетание условий одностороннего нагрева и закрутки потока, когда жидкость движется по «винтовому» каналу, температура стенки которого по ходу потока вначале возрастает, проходит через максимум, а затем уменьшается, позволяет ограничить возможность развития пристенного пузырькового слоя. Наличие этих особенностей приводит к отличию данных для прямого потока и закрученного при значениях массовой скорости. Можно предположить, что условия отвода тепла в ядро потока вынужденной конвекцией ограничивают и возможность предельного теплоотвода от стенки. КТП в этом случае соответствуют предельным отводимым нагрузкам. Наибольшая плотность теплового потока при пузырьковом кипении q_{max} соответствует предельной, с точки зрения термодинамики, температуре стенки, при которой еще возможно существование жидкости. При температуре стенки, превышающей температуру предельного перегрева жидкости при данном давлении, на стенке может существовать только паровая фаза. Кипение сильно недогретой жидкости характеризуется менее сильной зависимостью $q(\Delta T_s)$, и как показывают полученные опытные данные о КТП, достижение температуры предельного перегрева жидкости

происходит при относительно невысоких скоростях потока. Для условий прямолинейного потока и равномерного нагрева это возможно только в случае $q_{\max} < q_{\text{пр}}$, где $q_{\text{пр}}$ – предельная плотность теплового потока, отводимого вынужденной конвекцией в ядро потока от верхней границы пузырькового слоя на стенке, определяемой равенством $T_{\text{ж}} = T_{\text{s}}$. Закрутка потока приводит к увеличению скорости вблизи стенки в $(1 + k^2)^{0.5}$ раз и появлению дополнительного механизма теплоотвода в ядро потока, обусловленного «центробежной» конвекцией, которая возникает благодаря наличию градиента плотности жидкости в интенсивном поле массовых сил, действующих в закрученном потоке. Тогда выражение для предельной плотности теплового потока в условиях закрутки принимает вид [1]:

$$q_{\text{пр}} = \rho_{\text{ж}} w (1 + k^2)^{0.5} c_{\text{p}} (T_{\text{s}} - T_{\text{ж}}) \frac{\xi_* / 8}{1 - 12\sqrt{\xi_* / 8}} + q_{\text{ц}}, \quad (9.49)$$

где ξ_* рассчитывается с учетом увеличения скорости потока; $q_{\text{ц}}$ – вклад в плотность теплового потока «центробежной» конвекции; $q_{\text{ц}} = \alpha_{\text{ц}}(T_{\text{s}} - T_{\text{ж}})$; $\alpha_{\text{ц}}$ рассчитывается из соотношения (9.45); $T_{\text{ж}}$ – температура жидкости в «сечении» кризиса.

Рассмотренные особенности теплообмена при кипении сильно недогретого потока позволяют говорить о том, что при тепловых потоках на стенке на уровне критических, в основном теплоотвод от стенки обеспечивается за счет механизма кипения (испарение по границе сухих пятен). В рассматриваемой «двухступенчатой» модели теплоотвода (сначала от стенки до условной границы пузырькового слоя, определяемой равенством $T_{\text{ж}} = T_{\text{s}}$, а затем в однофазное ядро потока) присутствует и играющий значительно меньшую роль теплоотвод от стенки до условной границы за счет вынужденной конвекции. Теплоотвод непосредственно в ядро потока обеспечивается только вынужденной конвекцией. Уравнение (9.49) показывает, что в первом слагаемом равновеликие роли играют и скорость, и недогрев потока до температуры насыщения.

Условие превышения плотности теплового потока на стенке значений $q_{пр}$ конечно же нельзя трактовать как достаточное для достижения термодинамического предела кипения. Имеющиеся опытные данные о КТП при кипении в сильно недогретом прямолинейном потоке в условиях равномерного нагрева, сопровождавшиеся и температурными измерениями, позволяют утверждать, что температуры стенки при кризисе заведомо меньше температур предельного перегрева жидкости $T_{пп}$. Исключением является область высоких приведенных давлений и значительных скоростей потока, при которых собственно кипение может начинаться при температурах стенки, близких к $T_{пп}$.

Достижение термодинамического предела кипения при умеренных приведенных давлениях возможно, по-видимому, только в условиях, позволяющих ограничить развитие пристенного пузырькового слоя. Такие условия создаются в односторонне нагреваемых трубах с закруткой потока. Можно ожидать, что если исключить одно из условий подобных опытов: или убрать ленту, или обеспечить сглаживание неизотермичности внутреннего периметра канала, то плотность теплового потока на стенке должна быть близкой к определяемой уравнением (9.49). Это предположение подтверждает сопоставление опытных данных [12] о КТП, полученных в условиях одностороннего нагрева для трубы без ленты и при закрутке на рабочем участке с удлиненной нижней стороной, сглаживающей термическую неоднородность. Данные о $q_{кр}$ для трубы внутреннего диаметра 7 мм без ленты получены при $w = 6 \div 25$ м/с, $p_{вых} = 1$ МПа, $T_{вх} = 28,5 \div 30^\circ\text{C}$, а при закрутке потока на РУ с внутренним диаметром 7 мм при $w = 4 \div 20$ м/с, $p_{вых} = 1,0 \div 1,5$ МПа, $T_{вх} = 21,5 \div 25,5^\circ\text{C}$, $k = 0,52$. Фиксация кризиса была основана на данных измерений температуры стенки. На рисунке 9.15 представлено сравнение этих опытных данных о КТП с расчетом по (9.49) для прямого потока (без слагаемого $q_{ц}$) и для закрученного в виде зависимости отношения $q_{кр} / q_{пр}$ от скорости потока. На рисунке 9.15 показаны также поперечные сечения рабочих участков.

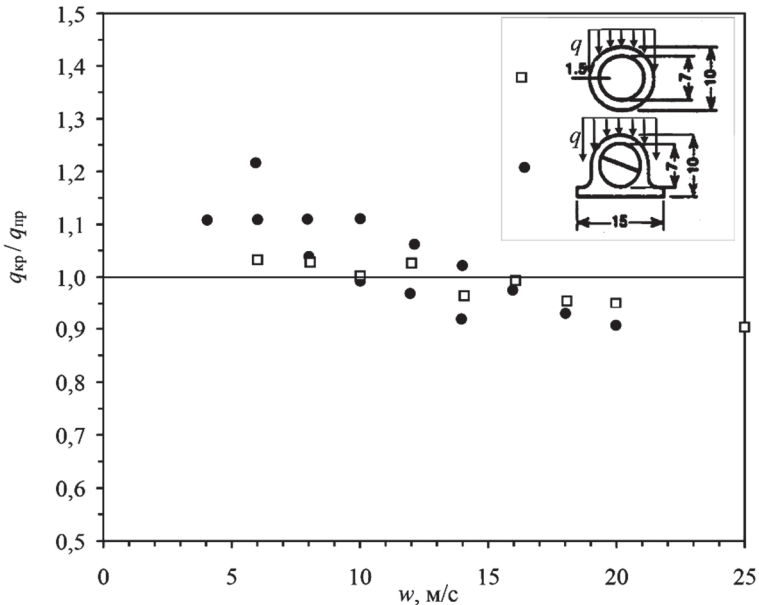


Рис. 9.15. Сравнение опытных данных о КТП [12] с расчетом для прямого потока (\square) и для закрученного (\bullet)

Данные, представленные на рис. 9.15, говорят о хорошем соответствии опытных значений КТП [12] расчету по (9.49).

Для данных о КТП при кипении в недогретом закрученном потоке при одностороннем нагреве электронным пучком [16] сравнение расчета по (9.49) показало значительное (доходящее до двух раз) превышение опытных значений КТП в сравнении с расчетными $q_{пр}$. К сожалению, опыты [16] не сопровождались температурными измерениями. Фиксация кризиса была основана на визуальных наблюдениях за тепловоспринимающей поверхностью. Согласно [16] в момент кризиса температура тепловоспринимающей поверхности превышала 800°C , что при толщине стенки 1,5 мм соответствует температуре в лобовой точке, значительно превосходящей температуру предельного перегрева жидкости. То есть для опытов [16] характерна ситуация, когда пленочное кипение занимает значительную часть внутреннего периметра канала. Кроме того, увеличению значений $q_{кр}$ способствовали осевые расточки тепла, ведь

из 400 мм РУ нагревалась только центральная зона длиной 100 мм. По-видимому, КТП, полученные в [16], определяют предельную плотность теплового потока, которая может быть отведена на всем периметре рабочего участка. Наличие зоны (даже весьма значительной) с ухудшенным теплообменом не приводит, как уже говорилось, к необратимому росту температуры до тех пор, пока на остальной части периметра существует возможность теплоотвода подводимой нагрузки. Перераспределение потоков тепла от центральной зоны к периферии возможно вследствие высокой теплопроводности материала мишени РУ. Может быть, для таких условий и сам термин КТП не является верным, оправданным представляется использование в [16] значения максимальной плотности подводимого теплового потока, определяющей условие механического разрушения РУ. Для расчета КТП, соответствующих достижению стенкой температуры предельного перегрева, может быть использована методика расчета теплообмена, представленная в п. 9.3.2. Использование в (9.46) условия равенства температуры стенки температуре предельного перегрева жидкости $T_{ст} = T_{пп}$ определяет термодинамически предельные значения тепловых потоков за счет однофазной конвекции и кипения [1]. Суммарный тепловой поток соответствует наступлению кризиса, т.е. формула (9.46) дает в этом случае значения $q_{кр}$. Подобный подход позволяет достигнуть удовлетворительного соответствия (подавляющее большинство точек в пределах 20% отклонения) расчета плотности теплового потока при условии $T_{ст} = T_{пп}$ опытными значениям КТП.

В заключение можно отметить, что достижение термодинамического предела при кипении в недогретом потоке при умеренных приведенных давлениях отмечено только в опытах при одностороннем нагреве и охлаждении закрученным потоком. Для таких условий максимальная плотность теплового потока на стенке определяется достижением условия $T_{ст} = T_{пп}$, а для всех других рассмотренных опытов достижением значений, определяемых (9.49).

9.3.4. Интенсификация теплообмена для задач охлаждения первой стенки и дивертора

Для интенсификации теплообмена в задачах охлаждения первой стенки и дивертора на этапе конструирования реактора было отобрано несколько способов, прошедших экспериментальное обоснование:

- закрутка потока с помощью скрученных лент (подробно рассмотрено выше);
- внутреннее оребрение каналов охлаждения по двум технологиям: гипервапотрон и винтовая резьба;
- нанесение пористого покрытия на теплообменную поверхность.

Рассмотрим основные результаты исследования интенсификации теплообмена и КТП перечисленными способами.

Гипервапотрон

Конструкция гипервапотрон (*hypervapotron*) применяется в ИТЭР для интенсификации теплообмена в каналах охлаждения первой стенки и дивертора. Также подобные конструкции предлагают использовать в системах внешнего охлаждения корпусов ядерных реакторов в аварийных режимах. Интенсификация обеспечивается поперечным оребрением теплообменной поверхности. Характерные размеры оребрения представлены на рис. 9.16, где представлен чертеж рабочего участка работы [17].

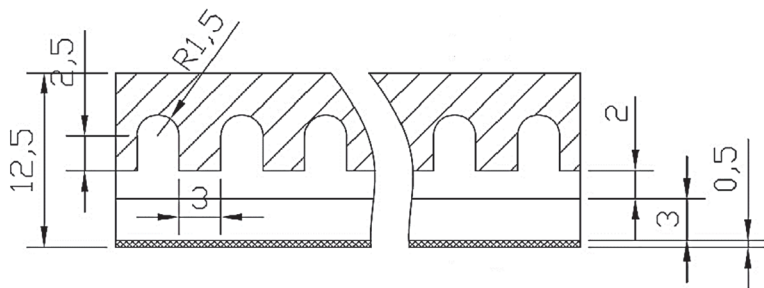


Рис. 9.16. Чертеж модуля гипервапотона

Работоспособность модулей гипервапотронов подтверждена экспериментально, в том числе и на термоядерных установках JET и NET. В работе [17] выполнены исследования теплообмена и КТП в гипервапотронных конструкциях при охлаждении водой в диапазоне параметров $p = 2,7 \div 3,7$ МПа, $w = 2 \div 5$ м/с, $T_{\text{вх}} = 80 \div 170^\circ\text{C}$. Плотность теплового потока варьировалась от $3 \div 5$ МВт/м². Исследованы режимы однофазной конвекции и кипения. При указанных плотностях теплового потока основным режимом теплообмена было пузырьковое кипение. Для расчета однофазной конвекции рекомендованы уравнения (9.4) и (9.6), теплообмена при кипении – эмпирическое уравнение работы [12], КТП наиболее надежно обобщает уравнение работы [18].

В работе [19] выполнены исследования КТП для девяти различных конструкций гипервапотронных модулей, получены 54 экспериментальных значения для температур жидкости на входе $65 \div 103^\circ\text{C}$, давлении $3,2 \div 3,4$ МПа, скорости воды $2 \div 6$ м/с. Показано, что тепловые потоки до $25 \div 30$ МВт/м² можно отводить при скорости $4 \div 6$ м/с. При плотности теплового потока более 20 МВт/м² температура поверхности значительно возростала, данные значения рекомендованы как предельные для гипервапотрона.

Экспериментальное обоснование гипервапотронных конструкций выполнено в НИИЭФа [20] и Евротоми [16] при параметрах потока воды ($T_{\text{вх}} = 20$ и 120°C , $p = 2,0$ и $3,5$ МПа, скорость потока воды 12 и 9 м/с соответственно).

Показано, что при нагрузках более 25 МВт/м² обеспечивается работоспособность конструкций при многократных циклах нагрева и охлаждения, КТП достигается при нагрузках более 30 МВт/м².

Представленные данные показывают работоспособность гипервапотронных конструкций при нагрузках по крайней мере до 20 МВт/м². Отвод тепла обеспечивается кипением в недогретом потоке. Уравнения для расчета теплообмена и КТП рекомендуются для обычных труб. В настоящее время, несмотря на сложность подобных конструкций, в ИТЭР и следующих поколениях

термоядерных установок гипервапотронные модули используются для охлаждения первой стенки. Расчет как теплового, так и прочностного модулей, выполняется проектными организациями на основе коммерческих пакетов программ.

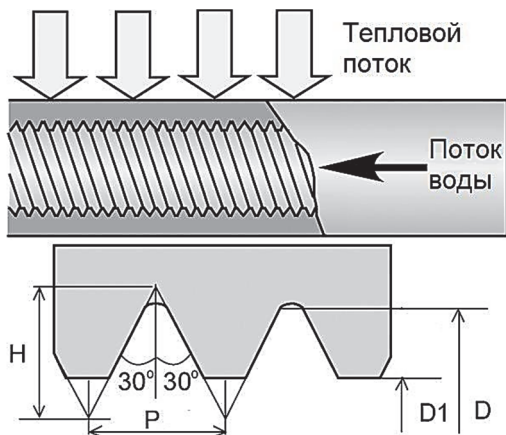
Для обеспечения лучшей интенсификации теплообмена и равномерности тепловых полей варьируются параметры оребрения (см. рис. 9.17).

Каналы с винтовой резьбой

Резьбовая внутренняя поверхность канала выполняет две функции: создает эффект оребрения и является источником турбулентных возмущений в потоке, что повышает теплообмен. Способ изготовления таких каналов недорогой и осуществляется простым нарезанием резьбы. Схематическое изображение канала представлено на рис. 9.17, параметры резьбы приведены в подписи. Эксперименты по определению КТП показали, что при скорости охлаждающей жидкости 10 м/с, локальном давлении около 1 МПа и температуре на входе равной комнатной, плотность теплового потока на поверхности, обращенной к плазме q_{e^*} для медной трубки (М10 шаг 1,5) составила 45 МВт/м², что более чем в два раза превышает значение для гладких труб и сопоставимо со значениями для каналов со вставленной скрученной лентой.

На рисунке 9.18 [21] представлено сравнение потерь давления для каналов с винтовой резьбой, каналов со вставленной скрученной лентой и без ленты. Внутренний диаметр каналов со вставленной лентой и без ленты 7 мм, внешний диаметр 10 мм. Потери давления для каналов с винтовой резьбой возрастают с увеличением шага резьбы. В случае шага резьбы равного 1,0 мм потери давления ниже на 15%, чем потери давления для каналов с лентой.

Зависимость q_{e^*} от скорости потока воды, при постоянном локальном давлении 1МПа, для различных охлаждающих каналов представлена на рис. 9.19 [21].



Параметры резьбы

Резьба	Шаг резьбы P , мм	H , мм	$D1$, мм	D , мм
M10	1,5	0,812	8,37	10
M10	1,0	0,541	8,92	10

Рис. 9.17. Канал с винтовой резьбой

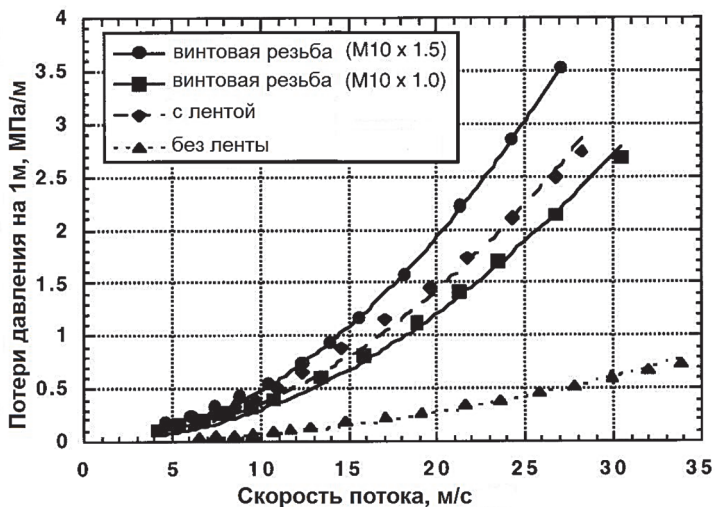


Рис. 8.18. Потери давления для каналов с винтовой резьбой, каналов со вставленной скрученной лентой и без ленты [21]

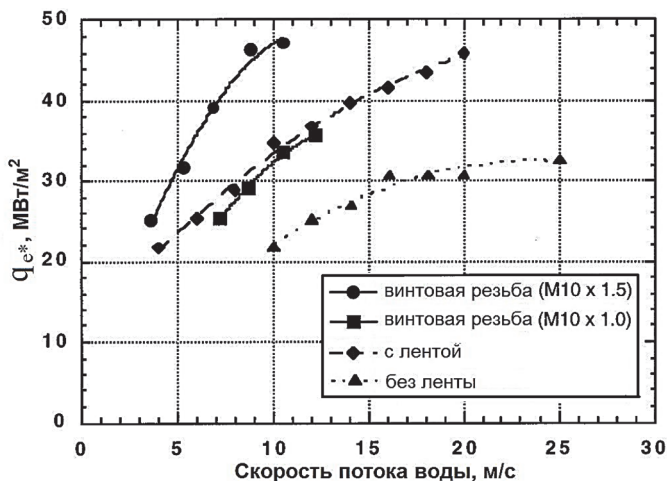


Рис. 9.19. Зависимость q_{c*} от скорости потока воды [21]

По данным рис. 9.19 видно, при скорости потока воды 10 м/с для каналов с винтовой резьбой M10 шаг 1,5 q_{c*} составляет 46 МВт/м², что более чем в 2 раза превышает значение для каналов без ленты и примерно в 1,4 раза для каналов с лентой. Основываясь на приведенных результатах можно рассматривать каналы с винтовой резьбой для системы охлаждения диверторных приемников. Однако база экспериментальных данных для этих каналов небольшая и существует потенциальная опасность возникновения трещин, данный метод интенсификации не рассматривается для дивертора ITER.

Каналы с пористым покрытием

Каналы с пористым покрытием были предложены со стороны РФ в качестве способа улучшения теплообмена и увеличения КТП при высоких тепловых нагрузках. Техника изготовления таких каналов основывается на весьма простой и недорогой технологии, состоящей из высокотемпературного обжига квазисферических металлических частиц (диаметром $\approx 50\div 100$ мкм) с последующим охлаждением.

Эксперименты по определению КТП проводились на прямоугольных моделях с цилиндрическими охлаждающими каналами, оснащенными массивом термопар. Нагрев осуществлялся электрическим током. Поперечный разрез модели представлен на рис. 9.20. Параметры моделей и охлаждающей жидкости приведены в табл. 9.3.



Рис. 9.20. Поперечный разрез модели

Таблица 9.3

Параметры экспериментов по определению КТП [22]

Параметры моделей	
Внутренний диаметр канала, мм	6,0÷15,0
Ширина модели, мм	8,5÷20,0
Параметры охлаждающей жидкости	
Давление на входе, МПа	0,1÷4,0
Температура на входе, °С	25÷150
Скорость потока, м/с	0,5÷10,0

Некоторые результаты экспериментов для канала диаметром 6 мм, ширины модели 13 мм и различной скорости охлаждающей жидкости представлены на рис. 9.21 [22], там же представлены результаты

экспериментов для таких же каналов без пористого покрытия. Увеличение КТП для каналов с пористым покрытием на 40÷60% по сравнению с гладкими каналами достигается при практически одинаковых потерях давления.

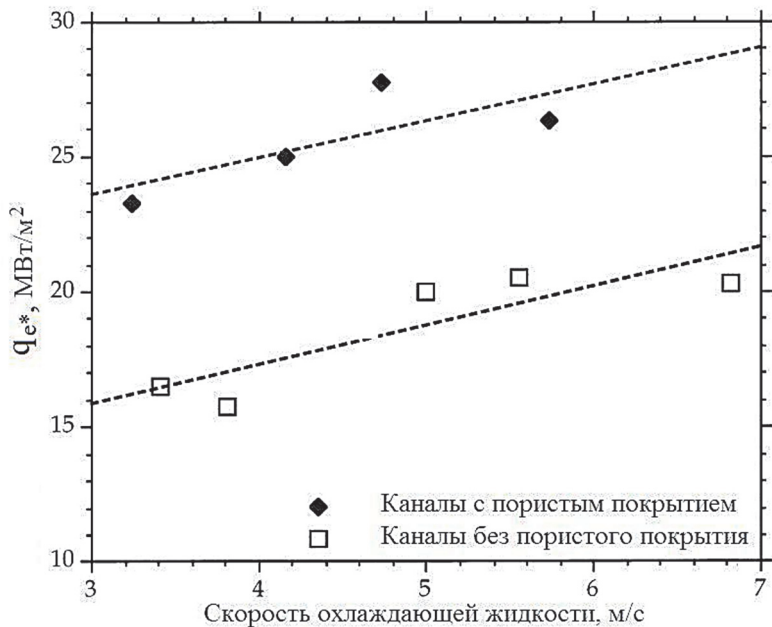


Рис. 9.21. Результаты экспериментов [22]

После ряда успешных экспериментов каналы с пористым покрытием рассматривались в качестве возможного варианта для системы охлаждения диверторных приемников ITER. Однако две серии экспериментов по определению q_{e*} , проведенные в *Sandia National Laboratory* (SNL), для параметров потока воды близких к параметрам потока системы охлаждения диверторных приемников показали следующие результаты:

1) 20,7 МВт/м², при давлении 4 МПа, температуре 150°С и скорости потока воды 10 м/с;

2) 24,5 МВт/м², при давлении 4 МПа, температуре 100°С и скорости потока воды 10 м/с.

Полученные значения $20\div 25 \text{ МВт/м}^2$ не обеспечивают должного запаса по КТП для диверторных теплообменников. Данный метод интенсификации не получил поддержку при реализации проекта ИТЭР.

По данным, представленным в п. 9.3.4 можно сделать вывод, что значение q_{e*} для всех типов интенсификации превышают значение КТП = 20 МВт/м^2 , установленное для ИТЭР, следовательно все конфигурации имеют перспективы применения для системы охлаждения первой стенки и дивертора ИТЭР. Особенностью гипервапоронных конструкций являются сравнительно большие потери давления на прокачку теплоносителя. Также существенным недостатком этой конструкции является сложность изготовления. В каналах с пористым покрытием, при высоких тепловых нагрузках, происходит повреждение пористого покрытия, вследствие чего теплообмен ухудшается. В каналах с винтовой резьбой, при нанесении резьбы нарушается целостность внутренней поверхности, что может привести к образованию трещин в конструкциях.

В реализуемом в настоящее время проекте ИТЭР для системы охлаждения приемников пучков и наиболее теплонапряженных приемников дивертора выбраны каналы со вставленной скрученной лентой, так как такая конфигурация каналов является наиболее простой, надежной и эффективной.

9.4. Текущая конфигурация системы охлаждения ИТЭР

9.4.1. Основные требования к проектированию СВОР

Успех ИТЭР во многом зависит от эффективного отвода тепла от blankets и дивертора, вакуумной камеры и других компонент на всех этапах работы реактора, в чем и состоит основное предназначение системы водяного охлаждения (СВО). СВО подразделяется на СВОР, которая будет поставляться США, и все остальные элементы, поставляемые Индией. СВО состоит из нескольких контуров охлаждения. СВОР включает в себя подсистемы охлаждения: вакуумной камеры; первой стенки/blankets; дивертора и лимитера; инжектора быстрых нейтральных атомов. Первично тепловая энергия

воспринимается СВОР, которая передает тепло в систему охлаждения для ядерных компонентов (первый контур). Посредством теплообменников далее тепло передается в систему охлаждения для неядерных компонентов (второй контур). От второго контура обеспечивается отвод тепла в окружающую среду.

При проектировании СВОР были приняты следующие условия работы реактора в целом. ИТЭР рассчитан на активную дейтерий-тритиевую фазу продолжительностью не менее 14 лет. Проект ИТЭР предусматривает, что работа с плазмой продолжается до 16 месяцев непрерывно в трех ежедневных 8 часовых рабочих сменах для выполнения следующих действий: плазменные операции, тестирование, подготовка, текущее обслуживание. ИТЭР рассчитан на работу в течение 12 дней подряд при одновременной работе в три смены в режиме плазменных операций. Исходя из этого, реактор ИТЭР всегда будет находиться в одном из следующих рабочих состояний:

- долгосрочное отключение (для углубленного технического обслуживания или модернизации после значительного периода ожидания для радиационного распада);

- краткосрочное обслуживание (обычные выходные, праздничные дни, короткие перерывы);

- тестирование и подготовка;

- краткосрочный режим ожидания (до операции в плазме);

- плазменные операции (все системы в рабочем состоянии).

Поскольку операции реактора ИТЭР будут переходить из одного рабочего состояния в другое в течение срока службы ИТЭР, СВОР будет необходимо работать в следующих различных режимах:

- плазменные операции;

- подготовка;

- режим ожидания;

- прогрев камеры;

- холостой ход;

- выключено;

- техническое обслуживание;

- пассивное охлаждение в случае аварии СВОР.

Каждый из этих активных режимов регламентируется требуемыми параметрами теплоносителя.

Для проектирования СВОР ключевыми вопросами являются: надежность системы, ее реализуемость, регламент технического обслуживания, доступность элементов для осмотра. Анализ с этих позиций проекта СВОР определяет: архитектуру системы; выбор элементов; вопросы управления; обнаружение и устранение неисправностей, требования к логистическим операциям, включая поставки запасных частей и испытательного оборудования.

СВОР обеспечивает раздачу охлаждающей воды для элементов ИТЭР, отвод тепла при авариях, подачу горячей воды для прогрева вакуумной камеры, удержание трития и радиоактивных продуктов коррозии. Подсистема охлаждения первой стенки и blankets имеет три независимые гидравлические петли, а остальные подсистемы однопетлевые, что в общей сложности составляет шесть гидравлических петель. До 2007 г. проектирование СВОР не предусматривало отказоустойчивости при выходе из строя отдельных компонентов – каждая петля была спроектирована так, чтобы функционировать без подключения к другим. Во время плазменных операций по проекту каждая петля работала на одном насосе, давление создавалось единственным устройством, включала один или несколько теплообменников. Отказ любого из этих устройств приводил бы к неработоспособности СВОР и отключению плазмы. Эти недостатки были учтены при последующем перепроектировании СВОР.

С точки зрения безопасности ИТЭР, СВОР должна обеспечивать отвод аккумулированного тепла от вакуумной камеры в аварийных ситуациях и удержание радиоактивных продуктов в первом контуре (третий и радиоактивные коррозионные отложения).

Вакуумная камера в силу массивной конструкции обладает значительной теплоемкостью, кроме того в элементах камеры присутствует и остаточное тепловыделение. Необходимо обеспечивать надежную циркуляцию теплоносителя, для чего в петле соответствующего контура установлен дополнительный аварийный насос. Охлаждение вакуумной камеры должно обеспечивать требуемый аварийный теплоотвод даже в случае отказа внутрикамерных охлаждающих систем. Все компоненты СВОР

под давлением являются ключевыми для безопасности, поскольку они удерживают радиоактивные продукты. Оборудование СВОР размещено в «ядерном острове», снабжено устройствами, регулирующими давление, и предохранительными клапанами для сброса в соответствующие резервуары. Материал и толщина труб выбираются в соответствии с номинальными характеристиками давления и температуры. Качество используемой воды контролируется системой водоподготовки.

При проектировании были учтены действующие во Франции требования охраны труда. Опасными факторами являются: радиоактивность, химическое воздействие, электромагнитное излучение, использование высокоэнергетических теплоносителей, сосудов под давлением, криогенных жидкостей и др. За исключением радиоактивности остальные факторы являются типичными для промышленности и при соблюдении правил проектирования и эксплуатации не представляют серьезной угрозы персоналу и окружающей среде.

С точки зрения ядерной безопасности представляют наибольшую угрозу: тритий (^3H), углерод (^{14}C), азот (^{16}N и ^{17}N) и радиоактивные продукты коррозии. Наибольшие концентрации у радиоактивных изотопов азота, но они имеют малый период полураспада (7,4 и 4,17 с соответственно) и не представляют опасности для персонала вне ядерного острова, окружающей среды и населения. Концентрация остальных радиоактивных изотопов такова, что не требуются специальные меры для защиты окружающей среды и населения при аварийных ситуациях.

Еще одним ограничением для проектирования системы СВОР являлись массогабаритные параметры поставляемого оборудования. Параметры используемых резервуаров для теплоносителей первого и второго контура таковы (диаметр до 6,2 м, высота до 10 м, масса до 55 т), что требовалось принятие специальных инженерных решений по перемещению резервуаров внутри помещений, и даже по выбору строительных решений, т.е. или сначала возведение перекрытий и ряда стен и затем их размещение, или наоборот. Кроме того, транспортировка резервуаров и других систем потребовала создания специальных машин.

В СВОР в качестве теплоносителя используется деминерализованная и очищенная от кислорода вода общим объемом 950 м³. Предусмотрены специальные системы для утилизации использованной воды, в том числе и очистка от радиоактивных элементов.

9.4.2. Конфигурация СВОР

Система СВОР состоит из шести основных гидравлических контуров, системы водоподготовки, системы заполнения и слива теплоносителя и системы осушки. Гидравлические контуры предназначены: 3 контура для охлаждения первой стенки и бланкета, по одному контуру для охлаждения дивертора и лимитера, вакуумной камеры, системы инъекции быстрых нейтральных атомов. Дополнительно обеспечивается охлаждение систем дополнительного нагрева плазмы, электронных компонент и систем диагностики плазмы. СВОР – единственная в своем роде система охлаждения, построенная с учетом требований радиационной безопасности, по сложности и объему аналогична системам охлаждения АЭС, но намного больше по размеру благодаря уникальной конструкции ИТЭР. СВОР способна отводить от реактора до 1 ГВт тепла. Компоновка СВОР представленная на рис. 9.22, является весьма сложной. СВОР состоит из 36 км (1200 т) трубопроводов и фитингов, 12 000 опорных конструкций, 3000 задвижек и вентиляей.

Каждая из трех петель охлаждения первой стенки и бланкета обеспечивает охлаждение трех 40-градусных секторов. Помимо первой стенки и бланкета эти петли обеспечивают охлаждение внутриворотных компонентов верхних и экваториальных портов, включая заглушки портов, вводы системы инъекции нейтральных атомов, тестовые модули бланкета. Петля охлаждения дивертора и лимитеров обеспечивает термостабилизацию 54 диверторных касет и двух портов лимитеров. Петля охлаждения вакуумной камеры подает воду к 18 секторам камеры (разбиты по 20 градусам). В петле предусмотрен насос аварийного охлаждения камеры. Одна гидравлическая петля обеспечивает охлаждение как низковольтных, так и высоковольтных компонентов систем инъекции нейтральных атомов. Система водоподготовки состоит из трех единичных устройств,

включенных в петли охлаждения первой стенки и blankets, дивертора и лимитеров, системы инъекции нейтральных атомов. Система заполнения и слива обеспечивают возможность частичного или полного слива теплоносителя из труб СВОР и внутрикамерных компонентов, для проведения технического обслуживания, ремонта и проверки. Система осушки требуется для сушки внутрикамерных компонентов (диверторные кассеты, модули blankets, заглушки вакуумной камеры) и их обслуживания или замены.

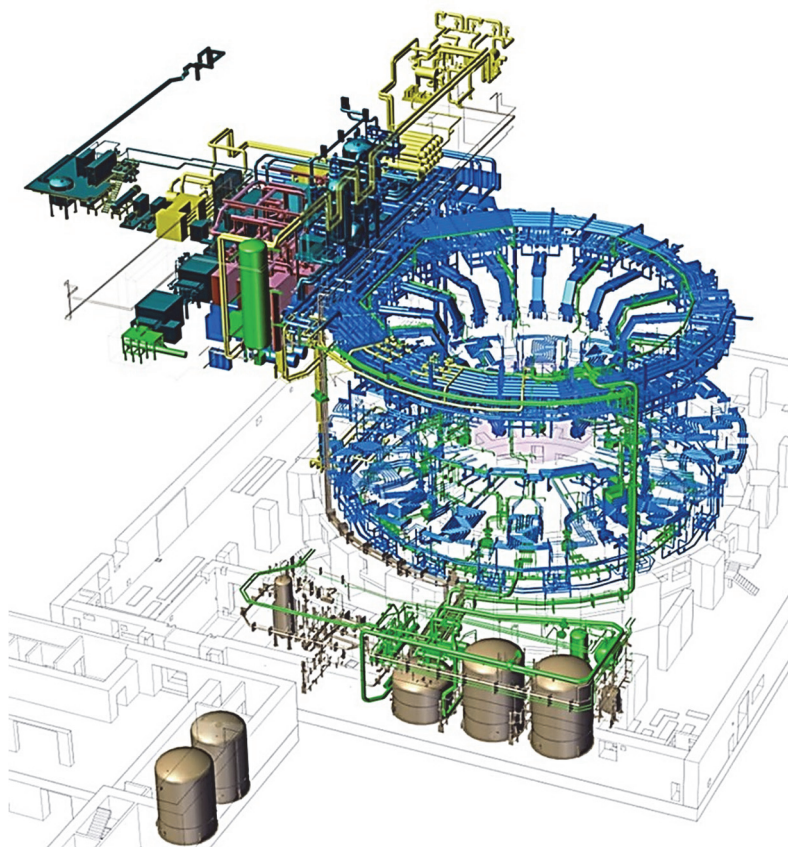


Рис. 9.22. Компоновочная схема СВОР

Петля охлаждения вакуумной камеры

Петля охлаждения вакуумной камеры обеспечивает течение теплоносителя через каналы охлаждения вакуумной камеры, диагностических портов, а также портов ввода системы инъекции нейтральных атомов. Петля обеспечивает реализацию следующих функций:

- отвода тепла от вакуумной камеры во время плазменных операций;
- поддержание температуры охлаждающей жидкости, давления и расхода для обеспечения требуемой термостабилизации компонентов вакуумной камеры во время операционной кампании;
- обеспечение аварийного охлаждения камеры и компонентов при выходе из строя других петель охлаждения;
- обеспечение прогрева вакуумной камеры для откачки;
- обеспечение первичного удержания радиоактивных продуктов коррозии и трития, захваченных охлаждающей водой, и поддержание герметичности камеры во всех режимах работы реактора;
- измерение потерь давления и количества отведенного тепла;
- обеспечение заполнения, слива и сушки элементов петли;
- обеспечение мониторинга химического состава воды;
- генерация управляющих сигналов для системы аварийного выключения реактора (низкий расход, низкий уровень воды в компенсаторе давления, высокая температура охлаждающей воды).

При работе реактора в режиме плазменных операций вода на выходе из охлаждаемых элементов (вакуумная камера, диагностические порты, порты ввода системы инъекции нейтральных атомов) имеет расчетную температуру 103°C. Компенсатор давления обеспечивает в раздаточном коллекторе давление воды 1,1 МПа при работе реактора в режимах настройки и плазменных операций и 2,4 МПа при прогреве стенок. Давление в компенсаторе создается напуском азота требуемого давления, газ отделен от воды диафрагмой, способной свободно перемещаться вверх и вниз при изменении уровня воды в компенсаторе. Предохранительный клапан, который выходит в систему вентиляции и детритизации, устанавливается для предотвращения чрезмерного повышения давления. Предусмотрен клапан контроля давления, регулирующий давление в компенсаторе.

На выходе вода проходит через теплообменник второго контура, где она охлаждается примерно до 100°C . Регулирующие вентили и байпасная линия обеспечивают поддержание постоянной температуры воды на выходе из теплообменника. Байпасная линия также используется в режиме прогрева, чтобы позволить потоку воды обойти теплообменник. Постоянный расход воды 950 кг/с в петле поддерживается основным насосом при работе реактора в режимах настройки и плазменных операций. Двигатель насоса охлаждается с помощью второго контура. Насос поддерживает постоянный расход воды 500 кг/с во время прогрева стенок. Вокруг основного насоса установлена байпасная линия с аварийным насосом и теплообменником, охлаждаемым водой второго контура. Обратный клапан, установленный за основным насосом, не допускает обратного потока воды в периоды, когда насос не используется. Фильтр расположен за насосом в специальной байпасной линии. Электрический нагреватель расположен ниже по потоку от насоса в байпасной линии, которая открывается только тогда, когда вода должна быть нагрета. Нагреватель поддерживает постоянную температуру 200°C во время прогрева и 100°C при работе реактора в режимах настройки и плазменных операций. Контроль температуры во время прогрева обеспечивает поддержание температура воды с допуском $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Далее вода раздается через трубопроводную магистраль к охлаждаемым элементам (вакуумная камера, диагностические порты, порты ввода системы инъекции нейтральных атомов).

Петля охлаждения первой стенки и blankets

Петля охлаждения вакуумной камеры обеспечивает течение теплоносителя через каналы охлаждения первой стенки и модулей blankets. Петля обеспечивает реализацию следующих функций:

– охлаждение всех модулей blankets и внутрипортовых компонентов верхних и экваториальных портов, включая заглушки портов, вводы системы инъекции нейтральных атомов, во время работы реактора в режиме плазменных операций;

– охлаждение катушек магнитного поля для компенсации ЭЛМов и вертикальной устойчивости;

- поддержание температуры охлаждающей жидкости, давления и расхода для обеспечения требуемой термостабилизации компонентов во время операционной кампании;
- отвод 690 МВт тепловой мощности во время работы реактора в режиме плазменных операций;
- охлаждение внутрикамерных компонентов при остаточном тепловыделении;
- прогрев внутрикамерных компонентов;
- первичное удержание радиоактивных продуктов коррозии и трития, захваченных охлаждающей водой, и поддержание герметичности во всех режимах работы реактора;
- измерение потерь давления и количества отведенного тепла от модулей blankets;
- обеспечение заполнения, слива и сушки элементов петли;
- обеспечение мониторинга химического состава воды;
- генерация управляющих сигналов для системы безопасности реактора.

Система охлаждения первой стенки и blankets состоит из трех независимых петель. Эти петли не идентичны, но похожи. Основное отличие состоит в том, что первая петля имеет резервуар для сброса давления, который принимает пар, сбрасываемый не только из первой петли, но также из двух других петель. Вода возвращается из внутрикамерных компонентов в теплообменник, охлаждаемый водой второго контура. В теплообменнике отводится примерно 230 МВт тепла в каждой петле. Для регулирования температуры охлаждающей воды предусмотрена байпасная линия в обход теплообменника. Управление потоками на байпасе и магистральных трубопроводах через теплообменник обеспечивается с помощью клапанов, которые регулируются в соответствии с измеренными температурами в характерных точках петель. Циркуляционный насос в каждой петле компенсирует потери давления в контуре и обеспечивает расход приблизительно 1130 кг/с охлаждающей воды во время работы ре-

актора в режиме плазменных операций. Насос также используется для нагрева охлаждающей жидкости в начале работы системы путем циркуляции воды через байпасную линию. Дополнительный насос с малым расходом (120 кг/с) установлен параллельно с циркуляционным насосом для обеспечения отвода тепла от внутрикамерных компонентов во время не плазменных операций. Дополнительный насос автоматически запускается в случае отключения циркуляционного насоса. Обратные клапаны установлены ниже по потоку за каждым насосом для параллельной работы. Электрический нагреватель установлен ниже по потоку за дополнительным насосом для нагрева воды до требуемой температуры 100°C перед запуском плазменных операций и обеспечения возможности прогрева внутрикамерных компонентов до 240°C. Давление создается паровым компенсатором, подключенным к холодной ветви петли за циркуляционным насосом. Предохранительные клапаны обеспечивают защиту элементов петель от избыточного давления. Выпуск от предохранительных клапанов направляется в резервуар сброса давления, который является общим для трех петель. Водой из второго контура обеспечивается охлаждение резервуара для поддержания давления и температуры. Байпасный трубопровод с запорными клапанами разделяет внутрикамерные компоненты и основные элементы петель и используется для технического обслуживания. Во время штатной работы петель система водоподготовки забирает охлаждающую воду из холодной ветви за теплообменником и возвращает ее в контур за циркуляционным насосом.

Для обеспечения охлаждения внутрикамерных компонентов от остаточного тепловыделения при отсеченном основном оборудовании петель (теплообменник, насос) система водоподготовки забирает охлаждающую воду из горячей ветви, обеспечивая циркуляцию воды через внутрикамерные компоненты и охлаждение ее в теплообменнике системы водоподготовки. В распределительном коллекторе петли вблизи ввода в камеру выполнены соединения для залива и слива воды, а также для операций сушки.

Петля охлаждения дивертора и лимитеров

Петля охлаждения дивертора и лимитеров обеспечивает течение теплоносителя через каналы кассет диверторов и портов лимитеров. Петля обеспечивает реализацию следующих функций:

- охлаждение диверторных кассет и портов лимитеров при работе реактора в режиме плазменных операций;
- поддержание температуры охлаждающей жидкости, давления и расхода для обеспечения требуемой термостабилизации компонентов во время операционной кампании;
- охлаждение внутрикамерных компонентов при остаточном тепловыделении;
- прогрев внутрикамерных компонентов;
- первичное удержание радиоактивных продуктов коррозии и трития, захваченных охлаждающей водой, и поддержание герметичности во всех режимах работы реактора;
- измерение потерь давления и количества отведенного тепла от диверторных кассет и портов лимитеров.
- обеспечение заполнения, слива и сушки элементов петли;
- обеспечение мониторинга химического состава воды;
- генерация управляющих сигналов для системы безопасности реактора.

Петля обеспечивает передачу через теплообменник второго контура 202 МВт тепла. Для поддержания температуры охлаждающей воды предусмотрена байпасная линия в обход теплообменника. Управление потоком через теплообменник обеспечивается клапанами, которые регулируются в соответствии с измеренными температурами в характерных точках петли. Для обеспечения необходимой температуры теплоносителя при небольших тепловых нагрузках в теплообменнике предусмотрена линия малого расхода. Циркуляционный насос компенсирует потери давления в петле и обеспечивает расход приблизительно 1100 кг/с охлаждающей воды во время работы реактора в режиме плазменных операций. Дополнительный насос с малым расходом (110 кг/с) установлен параллельно с циркуляционным насосом для обеспечения отвода тепла от внутрикамерных компонентов во время не плазменных операций. Дополнительный насос автоматически запускается в случае отключения

циркуляционного насоса. Обратные клапаны установлены ниже по потоку за каждым насосом для параллельной работы. Электрический нагреватель установлен ниже по потоку за дополнительным насосом для нагрева воды до требуемой температуры 100°C перед запуском плазменных операций и обеспечения возможности прогрева внутрикамерных компонентов до 240°C. Давление создается паровым компенсатором, подключенным к холодной ветви петли за циркуляционным насосом. Предохранительные клапаны обеспечивают защиту элементов петель от избыточного давления. Во время штатной работы петель система водоподготовки забирает охлаждающую воду из холодной ветви за теплообменником и возвращает ее в контур за циркуляционным насосом. В распределительном коллекторе петли вблизи ввода в камеру выполнены соединения для залива и слива воды, а также для операций сушки.

Петля охлаждения инжектора нейтральных атомов

Петля охлаждения инжектора нейтральных атомов обеспечивает термостабилизацию высоковольтных и низковольтных систем нагрева и диагностики плазмы инжекторов нейтральных атомов. Петля обеспечивает реализацию следующих функций:

- отвод 85,9 МВт тепловой мощности от инжекторов нейтральных атомов во время работы реактора в режиме плазменных операций (с возможностью увеличения до 126,4 МВт);
- поддержание температуры охлаждающей жидкости, давления и расхода для обеспечения требуемой термостабилизации компонентов во время операционной кампании;
- охлаждение компонентов инжекторов при остаточном тепловыделении;
- первичное удержание радиоактивных продуктов коррозии и трития, захваченных охлаждающей водой, и поддержание герметичности во всех режимах работы реактора;
- измерение потерь давления и количества отведенного тепла от компонентов инжекторов;
- обеспечение заполнения, слива и сушки элементов петли;

- обеспечение мониторинга химического состава воды;
- генерация управляющих сигналов для системы безопасности реактора.

В зависимости от температуры охлаждающей воды, давления и химических требований петля предназначена для обеспечения шести отдельных систем подачи охлаждающей воды:

- система заземления;
- высоковольтный сепаратор ионов и ускоритель;
- высоковольтный источник ионов;
- высоковольтная плазменная сетка;
- катушки низкого напряжения и коррекционные катушки;
- калориметр.

На выходе из теплообменника второго контура вода имеет температуру примерно 35°C. Для поддержания температуры охлаждающей воды предусмотрена байпасная линия в обход теплообменника. Управление потоком через теплообменник обеспечивается клапанами, которые регулируются в соответствии с измеренными температурами в характерных точках петли. Циркуляционный насос компенсирует потери давления в петле и обеспечивает требуемый расход теплоносителя. Система водоподготовки обеспечивает соответствие охлаждающей воды при 35°C химическим требованиям как для высоковольтных, так и низковольтных компонентов инжектора. При необходимости соответствовать более жестким ограничениям по проводимости воды для охлаждения высоковольтных компонентов предусмотрена возможность понижения температуры до 15°C. Для термостабилизации высоковольтной плазменной сетки обеспечивается нагрев воды с малым расходом (0,4 кг/с) с помощью дополнительного электрического нагревателя. Давление создается газовым компенсатором, подключенным к горячей ветви петли перед теплообменником. Предохранительный клапан, который выходит в систему вентиляции и детритизации, устанавливается для предотвращения чрезмерного повышения давления. Предусмотрен клапан контроля давления, регулирующий давление в компенсаторе. В распределительном коллекторе петли вблизи ввода в камеру выполнены соединения для залива и слива воды, а также для операций сушки.

Система водоподготовки и контроля объема теплоносителя.

Система водоподготовки и контроля объема теплоносителя обеспечивает реализацию следующих функций:

- контроль химического состава воды в петлях СВОР;
- удаление растворимых и нерастворимых примесей из воды;
- минимизация коррозии на смачиваемых поверхностях контуров охлаждения;
- очистка резервуаров и трубопроводов;
- предварительная обработка петель СВОР (для ввода в эксплуатацию и обслуживания);
- контроль запаса теплоносителя;
- подача двухфазной смеси в компенсаторы давления;
- отвод остаточного тепловыделения от внутрикамерных компонентов во время технического обслуживания;
- генерация управляющих сигналов для системы безопасности реактора.

Следующие конструктивные особенности обеспечивают требуемое качество химического состава воды:

- номинальный расход воды через систему водоподготовки ($1 \pm 2\%$ от расхода в петлях) достаточен для поддержания концентрации примесей в петлях СВОР в требуемых пределах. Система водоподготовки может работать при удвоенном номинальном расходе, в основном в режиме дезактивации или при необходимости;
- система водоподготовки работает в режимах плазмы, ожидания, простоя, технического обслуживания и дезактивации. В режиме прогрева вакуумной камеры секции ионного обмена, выпускного механического фильтра и мембранной дегазации отключается;
- отбор проб осуществляется на входе и выходе деминерализаторов для контроля их эффективности;
- длина трубопроводов достаточна для обеспечения распада изотопов азота ^{16}N и ^{17}N , образующихся во время работы реактора в плазменном режиме до поступления воды в деминерализаторы.

Каждый единичный элемент системы водоподготовки включает в себя необходимые компоненты: трубы, насосы, фильтры, корпуса фильтров, ионообменники, теплообменники, редукторы давления, клапаны и резервуары, а также контрольно-

измерительные приборы и контрольные устройства, необходимые для работы системы и мониторинга. Конструктивные решения системы водоподготовки основаны на существующих решениях и оборудовании систем водоподготовки ядерных реакторов. Каждый единичный элемент системы водоподготовки извлекает часть потока ($1 \div 2\%$ потока в петле) из соответствующей петли через отбор между теплообменником и насосом. Поток проходит сначала через входные механические фильтры для удаления нерастворимых продуктов коррозии и твердых частиц (размер $5 \div 10$ микрон). Входные фильтры работают взаимосвязано с системой обработки и хранения радиоактивных отходов для обращения с отработанным фильтрующим материалом.

Для выполнения функции отвода остаточного тепловыделения от внутрикамерных компонентов в условиях низких температур предусмотрено соединение системы водоподготовки с петлями в горячей ветви петли. После прохождения через фильтры вода во всех режимах работы реактора (кроме прогрева стенок) проходит через дроссель для снижения давления, а затем поступает в теплообменник для охлаждения. В теплообменнике, соединенном со вторым контуром, температура потока снижается до температуры, совместимой с работой ионообменных смол деминерализаторов ($< 50^\circ\text{C}$). Деминерализаторы используются для удаления растворимых примесей (например, железа, меди, натрия, диоксида кремния, хлорида, сульфата) с коэффициентом дезактивации $98 \div 99,5\%$. Деминерализаторы работают взаимосвязано с системой обработки и хранения радиоактивных отходов для передачи отработавшей смолы в контейнер для сбора радиоактивных отходов. Температура и давление ниже по потоку за теплообменником контролируются регулирующими клапанами, расположенными в главной магистрали и на байпасной линии в обвод теплообменника. Участок магистрали между дросселем и деминерализаторами имеет соединения, необходимые для слива и заполнения системы. После механических фильтров поток воды поступает в мембранную систему дегазации, прежде всего для удаления растворенного кислорода. Система дегазации работает совместно с системой подачи азота

для продувки мембран и системой обработки и хранения радиоактивных отходов для очистки продувочного газа и утилизации мембран. После системы дегазации поток воды поступает в резервуар, который компенсирует небольшие колебания объема воды в системе водоподготовки. После резервуара поток воды возвращается в петлю СВОР с помощью дополнительного насоса, обеспечивающего давление, необходимое для возврата потока.

Состав оборудования единичной установки системы водоподготовки для петли охлаждения системы инъекции нейтральных атомов более простой в сравнении с установками, обслуживаемыми другими петлями. Основные отличия следующие:

- из-за более низкого давления в петле нет необходимости в дросселе;
- из-за отсутствия режима прогрева отсутствует дополнительная байпасная линия;
- из-за использования газового компенсатора вместо парового нет линии подачи двухфазной смеси.

Система заполнения и слива теплоносителя. Система осушки

Система заполнения и слива теплоносителя выполняет следующие функции:

- обеспечение полного дренажа петель охлаждения первой стенки и бланкета, дивертора и лимитеров, инъекции нейтральных атомов и частичный дренаж петли охлаждения вакуумной камеры;
- обеспечение безопасного дренажа теплоносителя при аварийных ситуациях с охлаждением внутрикамерных элементов;
- обеспечение заполнения петель СВОР из резервуаров или системы деминерализации воды;
- обеспечение очистки теплоносителя в резервуарах с помощью системы водоподготовки;
- обеспечение первого защитного барьера во время операций слива и заполнения;
- обеспечение достаточной компенсации объема воды при тепловом расширении сверх резервуара системы водоподготовки;
- генерация управляющих сигналов для системы безопасности реактора.

Система осушки выполняет следующие функции:

- обеспечение полного слива теплоносителя из петель СВОР, модулей бланкетов и кассет диверторов для обнаружения и локализации утечек и технического обслуживания;

- обеспечение сушки трубопроводов петель СВОР модулей бланкетов и кассет диверторов (во время операции слива теплоносителя);

- обеспечение первого защитного барьера во время продувки и сушки;

- обеспечивает обработку слитой воды из петель СВОР.

Дренажные резервуары используются при обычной эксплуатации СВОР и в аварийных режимах. Дренажные резервуары предназначены для хранения теплоносителя во время технического обслуживания и осмотра петель, а также для компенсации увеличения объема воды при прогреве стенок камеры в системе водоподготовки. Слив воды обеспечивается как действием силы тяжести (вода переходит в дренажные резервуары при открытии соответствующих вентилей), так принудительно (вода выталкивается из петель в резервуары газообразным азотом под высоким давлением (4 МПа) и низкой температуре (50°C)). Во время обычной эксплуатации петли охлаждения первой стенки и бланкета, дивертора и лимитеров будут сливаться в два резервуара объемом 270 м³ каждый, петля охлаждения вакуумной камеры будет сливаться в один из аварийных резервуаров (предусмотрено два резервуара 270 м³ каждый). Отдельный резервуар объемом 100 м³ задействован для петли охлаждения инжектора нейтральных атомов, поскольку требования к водоподготовке для этой петли более жесткие. Аварийные сливные резервуары частично вакуумированы (до давления приблизительно 10 кПа), предусмотрена возможность очистки резервуаров после аварийного заполнения загрязненной жидкостью. Трубопроводы охлаждения диверторов подключены к дренажному резервуару со специальным баком-отстойником для облегчения слива. Отстойники и насосы для перекачки воды между дренажными резервуарами обеспечивают управление хранением воды во время технического обслуживания.

Заполнение водой петель охлаждения СВОР осуществляется с помощью нагнетательных насосов из дренажных резервуаров через систему водоподготовки. Заполнение петли охлаждения вакуумной камеры организовано отдельно. Оборудование системы заполнения и слива теплоносителя (за исключением системы для петли охлаждения вакуумной камеры, расположенной отдельно) размещено в зоне дренажных резервуаров на уровне фундамента здания реактора.

Система осушки

Осушение модулей бланкетов и диверторных кассет в проекте ИТЭР будет осуществляться поэлементно, от трех до восьми модулей и кассет. Операция осушки внутрикамерных компонент может быть разделена на три режима: режим нагрева, режим сброса давления и режим осушки. Система осушки для реализации этих режимов обеспечивает: сепарацию сливаемого теплоносителя, конденсацию воды, сепарацию двухфазного потока, фильтрацию, сжатие газа, рекуперацию энергии и нагрев газа. Система оснащена сливным сепаратором, двумя охлаждаемыми конденсаторами, сепаратором двухфазного потока, двумя фильтрами, двумя компрессорами, экономайзером, двумя теплообменниками и электронагревателем. Один компрессор обеспечивает продувку петли газообразным азотом, другой компрессор обеспечивает течение нагретого азота чтобы испарить и удалить оставшуюся жидкость.

Режим нагрева

Нагрев внутрикамерных компонент осуществляется газом при температуре, большей температуры насыщения оставшейся в трубопроводах воды. Течение газа обеспечивает компрессор, нагрев газа осуществляется в электрическом нагревателе.

Режим сброса давления

После нагрева внутрикамерных компонент и достижения температуры насыщения воды, система меняет режимы работы с нагрева на сброс давления. Газ при высоком давлении начинает поступать в систему вентиляции и детритизации, происходит сброс

давления до значения, соответствующего температуре насыщения воды, начинается конденсация водяного пара, содержащегося в газе. Конденсированная вода направляется в дренажные резервуары через соединенные трубопроводы.

Режим осушки

Режим осушки является продолжением режима сброса давления, при котором система удаляет испаренную воду из внутрикамерных компонент, происходит сепарация двухфазного потока, отвод жидкости в дренажный резервуар. Температура осушки, т.е. минимальная температура рабочего газа при подаче во внутрикамерные компоненты, установлена равной 150°C . Давление рабочего газа на входе во внутрикамерные компоненты в режиме нагрева составляет примерно 2,1 МПа, а в режиме осушки – примерно 0,6 МПа.

Контрольные вопросы и задания

1. Как элементы воспринимают тепловую нагрузку в ИТЭР?
2. Каковы значения плотностей тепловых потоков на приемниках диверторов и первой стенки при стационарной нагрузке и срывах плазмы?
3. Каковы характерные особенности условий теплообмена в оборудовании термоядерных реакторов и установок?
4. Запишите уравнение теплового баланса для потока жидкости в обогреваемом канале.
5. Какие законы включены в систему уравнений для конвективного теплообмена?
6. В каком виде задаются граничные условия в задачах конвективного теплообмена?
7. Назовите основные отличия ламинарных и турбулентных потоков.
8. Что такое пульсационная составляющая физической величины?

9. Какие основные методы расчета однофазного теплообмена при турбулентном течении?
10. Какова классификация основных моделей турбулентности?
11. Что такое вычислительная гидродинамика?
12. Назовите известные способы моделирования турбулентных течений. Перечислите их преимущества и недостатки.
13. Какие модели турбулентности используются в *Ansys Fluent*?
14. Назовите основные отличия теплообмена при кипении от вынужденной конвекции.
15. Какие характерные точки существуют на кривой кипения?
16. Почему образование паровых пузырьков происходит на нагреваемой поверхности, а не в объеме жидкости?
17. Почему при кипении жидкость вблизи стенки перегрета относительно температуры насыщения?
18. Какие значения КТО характерны для кипения воды в состоянии насыщения при атмосферном давлении в большом объеме?
19. Какой процесс обеспечивает высокую интенсивность теплообмена при кипении?
20. На каких положениях основан вывод формулы В.В. Ягова?
21. Что такое кризис теплообмена при кипении?
22. Какие модели известны для кризиса кипения в условиях свободной конвекции?
23. Какими параметрами характеризуют двухфазные потоки?
24. Что такое гомогенная модель двухфазного потока?
25. Какие предположения используются для расчета теплообмена при кипении в вынужденном потоке?
26. Как выглядит качественная зависимость $q_{кр}$ от относительной энтальпии потока при кипении в вынужденном потоке?
27. Назовите основные отличительные особенности теплообмена в термоядерных реакторах и установках.
28. Какими геометрическими параметрами характеризуется скрученная лента?
29. Какие уравнения используются для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в закрученном потоке?

30. Какие вторичные течения возникают в трубе со скрученной лентой?

31. Какие особенности ламинарно-турбулентного перехода в закрученном потоке?

32. Почему возрастают потери давления в закрученном потоке?

33. Какие дополнительные эффекты определяют теплообмен в трубе со скрученной лентой в сравнении с трубой без ленты?

34. Как выглядит качественная зависимость потерь давления в канале от плотности подводимого теплового потока при кипении недогретой жидкости?

35. Какие параметры определяют теплообмен при кипении недогретого потока?

36. В чем отличие теплообмена при кипении насыщенной и недогретой жидкости в каналах при вынужденном течении?

37. Как взаимосвязана структура двухфазного потока и механизм теплообмена при кипении недогретой жидкости в каналах при вынужденном течении?

38. Как получить значения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи при экспериментальном исследовании теплообмена и КТП в условиях одностороннего нагрева?

39. Какие расчетные соотношения для потерь давления и теплообмена при вынужденной однофазной конвекции рекомендованы?

40. Что такое «центробежная» конвекция?

41. Как экспериментально определить наступление кризиса теплообмена в опытах с односторонним нагревом?

42. Каков уровень КТП при кипении в недогретом закрученном потоке при одностороннем нагреве при разных скоростях воды?

43. Что такое термодинамический предел кипения?

44. Какие способы интенсификации теплообмена в задачах охлаждения первой стенки и дивертора прошли экспериментальную проверку?

45. Назовите преимущества и недостатки при использовании интенсификации теплообмена и КТП за счет нарезки резьбы и применения пористого покрытия.

46. Какие значения КТП достигнуты для разных методов интенсификации в задачах охлаждения первой стенки и дивертора?
47. Назовите основные цели проекта ИТЭР.
48. Какие этапы проектирования прошел проект ИТЭР?
49. Какие основные требования выдерживались при проектировании ИТЭР?
50. В каких режимах будет эксплуатироваться реактор?
51. Какие основные задачи решает система водяного охлаждения реактора?
52. Какова текущая конфигурация системы водяного охлаждения реактора?
53. Назовите основные характеристики гидравлических петель СВОР.
54. Из каких систем состоит СВОР?

Список рекомендуемой литературы

1. Дедов, А.В. Теплообмен и гидродинамика в термоядерных установках: учеб. пособие / А.В. Дедов. – М.: Издательство МЭИ, 2019.
2. Ягов, В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие / В.В. Ягов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2014.
3. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учеб. пособие / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев и др. – М.: Изд-во МЭИ. – 2003.
4. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издат. дом МЭИ, 2011.

Список использованной литературы

5. Liang, G. Pool boiling critical heat flux (CHF) – Part 1: Review of mechanisms, models, and correlations / G. Liang, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – № 117. – P. 1352–1367.

6. Lockhart, R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes / R. Lockhart, R. Martinelli // *Chem. Eng. Prog.* – 1949. – № 45. – P. 39–48.

7. Лабунцов, Д.А. Механика двухфазных систем ИД / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Издательство МЭИ, 2016.

8. Расчет сопротивления трения двухфазных потоков низкого давления на основе приближенных аналитических моделей / Н.О. Зубов, О.Н. Кабаньков, В.В. Ягов и др. // *Теплоэнергетика.* – 2017. – № 12. – С. 43–57.

9. Ягов, В.В. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении хладонов и высоких скоростях вынужденном движения / В.В. Ягов, В.А. Пузин, Л.А. Сукомел // *Теплоэнергетика.* – 1998. – № 3. – С. 11–19.

10. Chen J.C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, *Industrial and Engineering Chemistry / J.C. Chen // Process Design and Development.* – 1966. – №5 (3). – P. 322–329.

11. Groeneveld, D.C. The 1995 look-up table for critical heat flux in tubes / D.C. Groeneveld, L.K.H. Leung, P.L. Kirillov // *Nuclear Engineering and Design.* – 1996. – №163. – P. 1–23.

12. Experiment on heat transfer of smooth and swirl tubes under one-sided heating conditions / M. Araki., M. Ogawa, T. Kunugi et al. // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 1996. – Vol.39. – № 14. – P. 3045–3055.

13. Lopina, R.F. Heat transfer and pressure drop in tape-generated swirl flow of single-phase water / R.F. Lopina, A.E. Bergles // *Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME.* – 1969. – Vol. 91. – № 3. – P. 158–169.

14. Study on the Mechanism of Critical Heat Flux Enhancement for Subcooled Flow Boiling in a Tube with Internal Twisted Tape under Nonuniform Heating Conditions / H. Kinoshita, T. Yoshida, H. Nariai et al. // *Heat Transfer – Japanese Research.* – 1996. – № 25 (5). – P. 293–307.

15. Fukuyama, Y. Boiling transition and the possibility of spontaneous nucleation under high subcooling and high mass flux density flow in a tube / Y. Fukuyama, T. Kuriyama, N. Hirata // *Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco.* – 1986. – Vol. 5. – P. 2197–2202.

16. Boscary, J. Critical heat flux of water subcooled flow in one-side heated swirl tubes / J. Boscary, J. Fabre, J. Schlosser // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 1999. – Vol. 42. – № 2. – P. 287–301.

17. Zhao Heat transfer characteristics of subcooled water in a hypervapotron under high mass fluxes and high heat fluxes / G. Zhu, Q. Bi, J. Yan et al. / *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – № 129. – P. 580–590.

18. Celata, G.P. Burnout in highly subcooled flow boiling in small diameter tubes / G.P. Celata, M. Cumo, A. Mariani // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 1993. – Vol. 36. – № 5. – P. 1269–1285.

19. Vastra Experimental optimisation of a hypervapotron concept for ITER plasma facing components / F. Escourbiac, J. Schlosser, M. Merola et al. // *Fusion Engineering and Design*. – 2003. – №66–68. – P. 301–304.

20. Divavin, V.A. Boiling Crisis at Heat Transfer Intensification on Divertor Surfaces under Resistive and e-Stream Heating Condition / V.A. Divavin, S.A. Grigoriev // *Fusion Technology*. – 1996. – P. 311–314.

21. Critical heat flux experiments using a screw tube under DEMO divertor-relevant cooling conditions / K. Ezato, S. Suzuki, M. Dairaku et al. // *Fusion Engineering and Design*. – 2008. – №83. – P. 1097–1101.

22. Critical heat flux analysis and R&D for the design of the ITER divertor / A.R. Raffray, J. Schlosser, M. Akiba et al. // *Fusion Engineering and Design*. – 1999. – №45. – P. 377–407.

ГЛАВА 10. ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ РЕАКТОРА

Работа термоядерного реактора подразумевает поддержание параметров плазмы, необходимых для протекания ядерных реакций синтеза. Потери частиц из плазмы за счет выгорания в реакции синтеза и диффузии поперек магнитного поля потребуют их компенсации. Подпитка плазмы частицами D-T топлива обеспечивается системами топливной инжекции. Для работы компонентов дивертора в режимах с приемлемыми тепловыми потоками необходимо обеспечивать газонапуск примесных газов вместе с вакуумной откачкой из области дивертора. Для многократного использования извлеченных из вакуумной камеры компонентов топлива используется замкнутый цикл газоснабжения, включающий системы экстракции изотопов водорода из газовой смеси и их разделения до требуемого уровня. Комплекс систем, обеспечивающих оборот топливных изотопов водорода, условно называется тритиевым топливным циклом (ТЦ). В более широком смысле, системы ТЦ также должны обеспечивать безопасную эксплуатацию установки.

На рисунке 10.1 показана логическая схема ТЦ и выделены функции основных систем. В плазму инжектируется топливо в различном агрегатном состоянии (пучки быстрых атомов и криогенные пеллеты), а также осуществляется газонапуск в вакуумную камеру для обеспечения рабочих режимов удержания плазмы. Инжекция компонентов топлива требует их разделения – получения моноизотопных газов (с возможными примесями другого). Потери топлива за счет выгорания в реакции термоядерного синтеза, диффузии в конструкционные материалы и радиоактивного распада трития должны компенсироваться из хранилища изотопов водорода.

На рисунке 10.1 приведены сокращения, принятые в международном сообществе: PEG (*plasma enhanced gases*) – примесные газы, обеспечивающие лучшие условия удержания плазмы; GIS (*gas injection system*), PIS (*pellet injection system*), NBI (*neutral beam injection*) – системы инжекции компонентов топлива в виде газа, конденсированных пеллет или нейтральных пучков соответственно.

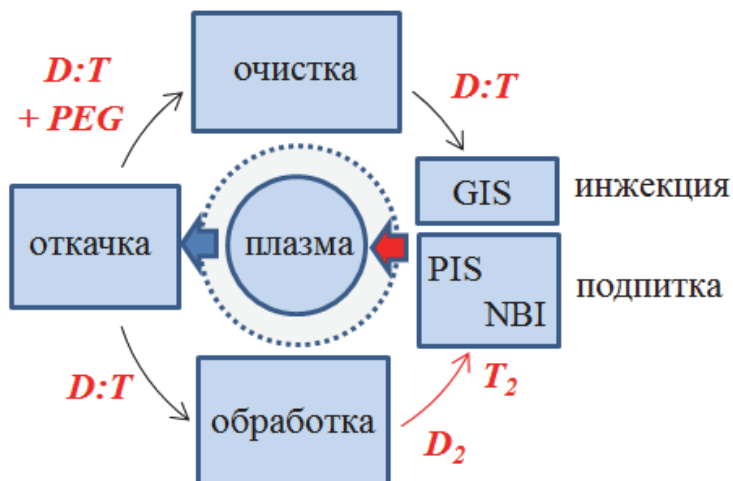


Рис. 10.1. Схема топливного цикла

Основной задачей термоядерного реактора (ТЯР) является выработка электроэнергии при ее многократном превышении над электрической мощностью, необходимой для обеспечения работы установки (отношение этих величин определяется коэффициентом Q , который в данном случае должен быть много больше 1). Потребление трития реактором с $Q \sim 10 \div 30$ и электрической мощности, сопоставимой с существующими реакторами деления, составит $50 \div 150$ кг в год. Такого количества трития нет в природе и они не могут быть обеспечены существующими реакторами деления- наработчиками трития. В связи с этим для работы энергетического термоядерного реактора необходимо производить наработку трития в самом реакторе. Для обеспечения воспроизводства трития в реакторе предусмотрен бланкет. В нем происходит захват термоядерных нейтронов литием с образованием трития. В зависимости от конструкции бланкета и площади, которую он занимает по отношению к плазме, можно получить коэффициент воспроизводства трития (TBR – tritium breeding ratio), близкий к величине $1,05 \div 1,1$, что обеспечит потребности установки с точки зрения выгорания компонента топлива в плазме и радиоактивного распада трития.

Все системы ТЦ должны образовывать цикл с минимальными запасами изотопов водорода в компонентах для обеспечения безопасности эксплуатации установки. Дополнительные меры безопасности в штатных и аварийных режимах работы достигаются за счет использования систем извлечения трития из водных и воздушных потоков.

Далее рассмотрены все системы ТЦ на примере реактора ИТЭР, а также проанализированы вопросы обеспечения безопасности на термоядерной установке.

10.1. Характеристики безопасности эксплуатации для ТЯР

В термоядерном реакторе будет содержаться большое количество трития (который используется в качестве топлива), при этом его выбросы в окружающую среду строго регулируются законом и должны быть довольно низким. Чтобы защитить персонал установки/реактора, население и окружающую среду от воздействия трития, очень важно надежно ограничить его проникновение из топливного цикла в рабочие помещения и окружающую среду. Далее в общих чертах сформулированы требования к безопасному обращению с тритием в разрезе применения к термоядерным системам. Поскольку тритий имеет свойство легко проникать даже через металлы, возможность выброса трития в окружающую среду должно подавляться комплексом мер (множественных ограничений), основанным на концепции многоуровневой защиты. Такая система мер была принята на многих объектах по обращению с тритием по всему миру и успешно эксплуатировалась в течение многих лет. При работе установки будут образовываться различные виды отходов, загрязненных тритием, необходимо уделять особое внимание при обращении с ними.

Для обеспечения радиационной безопасности термоядерного объекта радиологический контроль и защита от трития и активированных нейтронным облучением материалов является важнейшим вопросом. Основная концепция защиты человека от радиации предложена неправительственной международной организацией,

Международной комиссией по радиологической защите (ICRP). Многие страны соблюдают рекомендации ICRP и применяют их в качестве своих национальных нормативных актов. Эти предложения известны как концепция ALARA: «Вероятность облучения, количество облученных людей и величина их индивидуальных доз должны поддерживаться на разумно достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов».

Невозможно избежать утечки определенного количества трития из любых систем обработки, содержащих большое его количество. Что касается ТЦ термоядерного объекта, в различных случаях, таких как техническое обслуживание оборудования для обработки топлива, замена внутрикамерных компонентов (таких как дивертор, бланкет и др.) и обработка отходов, персонал должен обращаться с загрязненными тритием материалами в закрытом пространстве. Внутреннее облучение рабочих должно быть уменьшено в соответствии с концепцией ALARA.

Основные концепции защиты от внешнего воздействия следующие:

- снижение количества радиоактивных материалов, с которыми работают рабочие;
- соблюдение достаточного расстояния между источником излучения и телом;
- размещение экранирующего материала между источником излучения и телом;
- сокращение времени воздействия радиации.

Во время работы термоядерного объекта персонал не должен иметь доступа в зону реактора с высокой дозой облучения. Во время технического обслуживания и ремонта активированных внутрикамерных компонентов помещение горячей камеры становится зоной высокой радиации в дополнение к зоне реактора. Кроме того, определенное количество активированной пыли будет рассеиваться в процессе транспортировки компонентов внутри корпуса из зоны реактора в помещения горячей камеры.

Оценка уровня загрязнения и строгий контроль доступа к возможным загрязненным участкам в этих помещениях важны для защиты рабочих от радиационного воздействия.

Радиоактивное излучение трития не является значимой угрозой в случае внешнего излучения ввиду относительно низкой энергии распада, несмотря на высокую удельную активность, вызванную относительно небольшим периодом полураспада. При этом из-за замещения других изотопов водорода (протий и дейтерий) в органических и биологически важных соединениях тритий легко встраивается в биологические цепочки и является опасным источником внутреннего облучения как персонала, так и населения. При внутреннем облучении практически вся энергия распада трития поглощается тканями организма, что приводит к образованию радиационноиндуцированных повреждений органических и неорганических соединений, приводящих к образованию химически агрессивных радикалов и, впоследствии, химических соединений, не свойственных данным тканям организма. Более того, если распавшийся атом трития был включен в сложную органическую молекулу (например, молекулу ДНК или РНК), его распад может привести к изменению ее свойств, а следовательно к потере ею своих биологических функций.

Внутреннее облучение вызывается радиоактивными материалами, попадающими в организм человека при вдыхании, проглатывании, абсорбции или инъекции. Ниже приведены основные механизмы защиты от внутреннего радиационного облучения:

- изоляция радиоактивных материалов от рабочих физическими барьерами;
- ношение средств защиты органов дыхания во избежание вдыхания радиоактивных материалов или радиоактивной пыли;
- вентиляция воздуха для снижения уровня загрязнения рабочей зоны;
- надлежащий мониторинг концентрации радиоактивных материалов в воздухе;
- запрещение есть и пить на любых загрязненных территориях.

С точки зрения встраивания в биологические циклы наиболее доступными являются оксид трития (T_2O , НТО, DTO) и некоторые другие соединения. Тритий в молекулярной форме (T_2 , НТ, DT) хуже задерживается в организме. Данный факт приводит к значительно более строгим нормам по содержанию трития в форме оксида

в воздухе рабочих помещений согласно Нормам Радиационной Безопасности (НРБ). Как следствие, любые операции, приводящие к образованию соединений трития в топливном цикле, существенно снижают его безопасность.

По своим химическим свойствам тритий практически идентичен другим изотопам водорода. Поэтому необходимо предпринимать специальные меры для предотвращения самовоспламенения трития и образования смесей трития и кислорода или воздуха (так называемой «гремучей» смеси). Это приводит к необходимости исключения возможности проникновения трития в окружающую среду, а также проникновения кислорода, и других атмосферных газов в оборудование, предназначенное для работы с тритием. Следует отметить, что тритий распределен и изолирован в отдельных подсистемах топливного цикла термоядерной установки, количество трития в подсистемах даже при полном высвобождении не должно привести к образованию взрывоопасной смеси. Тритий не является источником ядерной, магнитной, токсической и других видов опасности.

Для формирования требований по безопасной эксплуатации ТЯР необходимо учитывать существующие нормы для ядерных объектов (АЭС и химических комбинатов), а также объектов, работающих со значительными количествами трития. Для реакторов деления и будущих термоядерных установок наиболее важной проблемой безопасности является минимизация выбросов радиоактивных материалов в окружающую среду. Следующие три правила представляют собой фундаментальные правила обеспечения безопасности в реакторах деления.

1. **Остановка реактора:** при возникновении аномального события при реакции деления производится немедленная остановка реактора.

2. **Охлаждение реактора:** остаточное тепло продуктов деления удаляется путем охлаждения, чтобы предотвратить повреждение физических барьеров, удерживающих продукты деления.

3. **Удержание радиации:** радиоактивные материалы удерживаются в реакторе деления для защиты населения от радиационного воздействия.

В случае термоядерной установки реакция синтеза останавливается без процедур «остановки реактора», как только в вакуумной камере происходит аномальное событие. Тепло от распада активированных материалов может быть удалено без использования активного охлаждения, поскольку количество тепла при этом намного меньше, чем у реактора деления. Между тем, работа внутрикамерных компонентов установки наряду с работой вспомогательных систем требуют активного охлаждения, в том числе после остановки реакции синтеза. Тем не менее, важность процедур «выключения» и «охлаждения» ниже, чем «удержание» для этого типа установок. С точки зрения безопасности термоядерного реактора, удержание трития и других радиоактивных материалов является наиболее важным вопросом. Поскольку гибридные системы синтез-деление будут сочетать в себе физические процессы, протекающие как в реакторах деления, так и синтеза, следовательно, требования по безопасности для них будут выше, чем отдельно для каждого типа установок.

10.1.1. Принципы обеспечения безопасности

Многоуровневая защита. Концепция многоуровневой защиты применялась для локализации радиоактивных материалов в ядерных установках. Система удержания трития на термоядерном объекте должна быть создана на основе этой концепции. На рисунке 10.2 показана концептуальная иллюстрация многоуровневой защиты, которая обычно разбита на пять уровней. Цели и средства на каждом уровне, согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), сведены в табл. 10.1. Если один уровень терпит неудачу, то задача решается на следующем уровне. Задача первого уровня защиты – предотвращение ненормальных режимов работы и сбоев системы. Если первый уровень выходит из строя, нештатные сценарии контролируются или сбой системы обнаруживаются вторым уровнем защиты. В случае отказа второго уровня третий уровень обеспечивает дальнейшее выполнение функций безопасности путем активации определенных систем безопасности. В случае отказа третьего уровня четвертый

уровень ограничивает развитие аварии посредством управления аварией, чтобы предотвратить или смягчить тяжелые аварийные последствия с внешними выбросами радиоактивных материалов. Последний барьер (пятый уровень защиты) – смягчение радиологических последствий и значительных внешних выбросов посредством аварийного реагирования за пределами площадки. Стратегия многоуровневой защиты подразумевает два направления: первое – предотвращение несчастных случаев и второе – в случае неудачи предотвращения – ограничение их потенциальных последствий и предотвращение любого развития до более серьезных состояний.

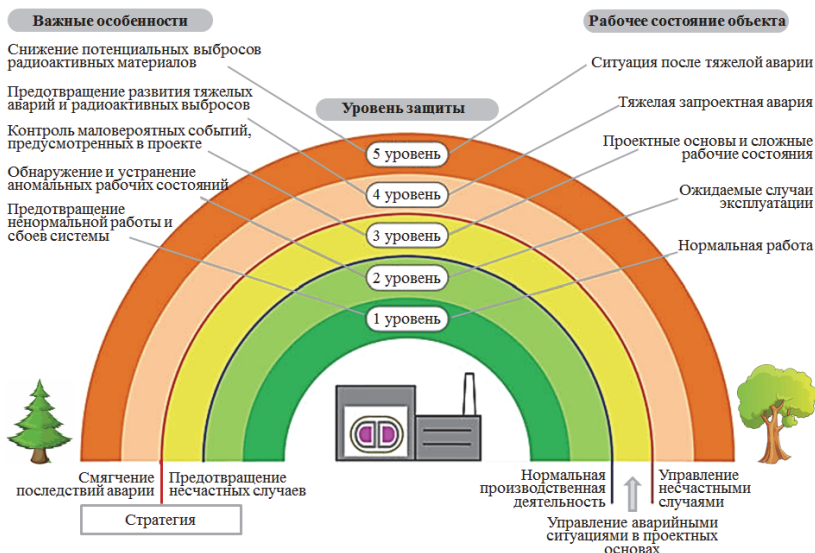


Рис. 10.2. Концепция многоуровневой защиты

Контроль трития и его соединений. Как уже отмечалось, для безопасной эксплуатации термоядерной установки наиболее важным вопросом является сдерживание трития. Ряд крупномасштабных установок для обращения с Т были построены и эксплуатируются в тритиевых лабораториях, вместе с тем были созданы и прошли успешную эксплуатацию два специализированных комплекса ТЦ на термоядерных установках токамак. Накопленных

к настоящему моменту результатов и опыта обращения с тритием достаточно для формирования требований и разработки нормативов для безопасной эксплуатации ТЯР и создания современных систем для работы с большими количествами трития в ТЦ, чем было продемонстрировано ранее.

Таблица 10.1

Уровни защиты

Уровни защиты	Задача	Основные средства
Уровень 1	Предупреждение ненормальной работы и отказов	Консервативный дизайн и высокое качество строительства
Уровень 2	Контроль ненормальной работы и обнаружение отказов	Системы управления, ограничения и защиты, а также другие функции мониторинга
Уровень 3	Контроль аварий в проектных условиях	Инженерные средства безопасности и аварийные процедуры
Уровень 4	Контроль состояния на объекте, включая предотвращение развития аварии и смягчение последствий тяжелых аварий	Дополнительные меры и управление несчастными случаями
Уровень 5	Смягчение радиологических последствий и значительных выбросов радиоактивных материалов	Экстренное реагирование за пределами площадки

Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями в таких установках должна обеспечиваться организационными и техническими мерами.

К организационным мерам относятся режимы работы установок и оборудования, формирование и выполнение требований радиационной безопасности, в том числе касающиеся квалификации персонала и другие. Организационные меры включают: дозиметрию, в том числе контроль внутренней дозы облучения персонала; контроль квалификации персонала, обучение персонала (в том числе тренировки); контроль доступа; контроль выполнения требований безопасности.

Организационные и технические меры радиационной безопасности на объекте для работы с тритием и его соединениями должны быть отражены и обоснованы в проекте и эксплуатационной документации объекта. На проект объекта должны быть получены необходимые документы. Контроль выполнения требований радиационной безопасности должен осуществляться соответствующими надзорными органами.

К техническим мерам относятся приборы, оборудование, технические средства, установки, методы для безопасной работы с тритием, локализация оборудования для работы с тритием на объекте, создание и поддержание в необходимом состоянии барьеров для нераспространения трития при нормальной эксплуатации оборудования, системы для защиты персонала, а также специальные средства для ликвидации последствий нештатных и аварийных ситуаций. Технические меры включают: системы хранения трития; системы удержания трития (многобарьерная защита); измерительное оборудование.

Нормативное обеспечение. Нормативное регулирование деятельности, связанной с обращением с тритием и его соединениями в различных формах, основано на федеральных законах, указах президента РФ, постановлениях правительства и т.д. К основным из них следует отнести следующее:

- Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии»;
- Федеральный закон от 04.05.2011 № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности»;
- Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»;
- Федеральный закон от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Основные требования к безопасности при работе с тритием и его соединениями установлены в следующих документах:

- санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)»;

- санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»;

- санитарные правила СП 2.6.1. 05-04 «Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями» (СП РБ-РТС-04)).

Функция надзора за деятельностью организаций, осуществляющих обращение с тритием и его соединениями возложена на следующие федеральные органы исполнительной власти:

- Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).

- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

- Федеральное медико-биологическое агентство (ФМБА России).

Для осуществления деятельности по обращению с тритием и его соединениями организации должны предварительно доказать выполнение требований безопасности и получить следующие документы:

- лицензию на право работ с тритием и его соединениями (в зависимости от вида деятельности). Лицензии на отдельные виды деятельности (например, на право работ с источниками ионизирующего излучения, на транспортировку радиоактивных веществ и т.д.) выдает Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор);

- санитарный паспорт помещений, объектов или территорий, в которых планируется осуществление деятельности, связанной с обращением с тритием и его соединениями. Выполнение санитарных требований в помещениях для работы с тритием подтверждает Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) и Федеральное медико-биологическое агентство (ФМБА России).

Цели и принципы радиационной безопасности при работе с тритием по отношению к населению, персоналу и окружающей среде соответствуют указанным в перечисленных выше документах, а именно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

Основной целью обеспечения радиационной безопасности по тритию является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения трития путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при операциях с тритием в подсистемах термоядерной установки, включая камеру токамака, системы инъекции топлива, системы топливного цикла.

К принципам обеспечения радиационной безопасности по отношению к тритию в рамках работы термоядерной установки относятся:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования). Пределы индивидуальных доз облучения от трития и его соединений установлены Нормами Радиационной Безопасности (НРБ 99/2009);

- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования). Все операции с тритием и его соединениями в рамках работы установки подлежат обоснованию, согласованию с местными и федеральными органами исполнительной власти, исполняющими функции надзора, и другими контролирующими органами, с обязательным получением санитарного паспорта объекта и лицензии на право осуществления работ, а также других необходимых документов;

- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании трития и его соединений, а также других источников излучения (принцип оптимизации). Все операции с тритием и его соединениями, а также работа с установками, приборами и т.д. подлежат регламентированию, а именно должны быть установлены соответствующие процедуры, описанные в виде регламентов, инструкций и других документов, в том числе в них должны быть определены требования

к квалификации персонала и действиям как при нормальной эксплуатации установок и приборов, так и в случае внештатных и аварийных ситуаций.

Методы безопасной работы с тритием и его соединениями.

Тритий в молекулярной форме при нормальных условиях существует в виде газа, поэтому для обращения с тритием используют замкнутые предварительно подготовленные емкости или химически связанные формы трития (в жидкой или твердой фазе). Являясь изотопом водорода, тритий в заметных количествах поглощается металлами, являющимися основными конструкционными материалами оборудования и емкостей для хранения, и с высокой скоростью диффундирует в окружающую среду. При попадании в окружающую среду тритий реагирует с кислородом и некоторыми другими веществами, а также вступает в реакции изотопного обмена с водородсодержащими молекулами. Собственная радиоактивность трития способствует этим процессам, так как энергия, выделяющаяся в результате радиоактивного распада, позволяет протекать химическим реакциям, невозможным в данных условиях для других изотопов водорода.

Следовательно, для предотвращения попадания трития в воздух рабочих помещений, организм персонала, окружающую среду необходимо снижать накопление и диффузию трития в материалах оборудования, а именно снижать давление трития в оборудовании, рабочие температурные режимы, уменьшать временные промежутки работы с тритием при высоких давлениях и температурах и т.д. Данные меры также эффективны для предотвращения нештатных ситуаций и аварий, связанных с потерей герметичности оборудования для работы с тритием. Для предотвращения проникновения трития за пределы корпуса оборудования также применяют подход, заключающийся в создании дополнительных барьеров вокруг оборудования, работающего с тритием.

Принимая во внимание свойства трития, а также его опасность по отношению к человеку и окружающей среде, в настоящее время применяется многобарьерный подход (рис. 10.3) для удержания трития и недопущения попадания трития в организм персонала, населения или окружающую среду.

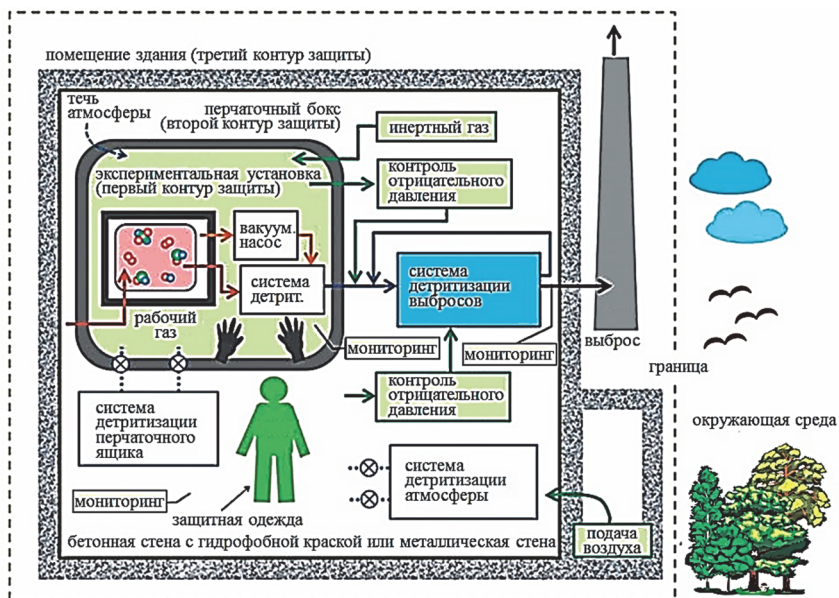


Рис. 10.3. Условная схема трехконтурной системы удержания

Первым барьером для распространения трития служат, собственно, границы аппаратуры и оборудования, в которых находится тритий, включая систему газовых трубопроводов, газовые клапаны, краны и вентили, насосы и т.д. Особое внимание уделяется материалам и исполнению таких установок. В качестве материалов для работы с тритием применяют различные стали, некоторые бронзы и сплавы алюминия, в том числе со специальными покрытиями. В некоторых случаях возможно применение кварца или керамических материалов в элементах оборудования, подверженных нагреву. Предпочтительно сварное и цельнометаллическое исполнение установок для работы с тритием. Исключением могут служить соединения с узлами подверженными износу (насосы, газовые клапаны и т.д.). Запас прочности элементов установок для работы с тритием должен позволять им работать при превышении проектного давления в 1,5 и более раз. В некоторых случаях (например, при работе с жидким тритием в системе ректификации изотопов водорода) должны быть предусмотрены предохранительные системы для сброса давления трития в ресивер.

Вторым барьером служит перчаточный бокс (или другое герметичное сооружение), в котором создается контролируемая разряженная атмосфера, в некоторых случаях инертного газа (N_2 , Ar, He). Конструкция перчаточного бокса должна позволять выполнять операции на оборудовании и установках, а также контролировать состояние атмосферы в боксе, содержание трития, улавливать тритий из газовой фазы, проводить обращение с тритийсодержащими отходами.

Третьим барьером служит помещение или само здание, в котором расположено оборудование для работы с тритием. Третий барьер должен обеспечивать удержание трития в своих границах (в том числе в нештатных ситуациях и авариях), позволять удалять тритий из атмосферы помещений (при превышении допустимых пределов), контролировать содержание трития в воздухе.

Основным параметром, определяющим комплекс мер для обеспечения радиационной безопасности, является количество трития на рабочем месте, и подразумевает деление помещений на классы (табл. 10.2). Допускается хранение открытых радиоактивных источников, содержащих тритий в хранилищах (складах) внутри контейнеров, превышающих разрешенную активность в данном помещении вплоть до ста раз.

Таблица 10.2

**Разделение помещений в зависимости
от содержания в них трития**

Класс работ	Суммарная активность трития на рабочем месте, Бк (Ки)
I класс	Более 10^{14} Бк ($2,7 \times 10^3$ Ки)
II класс	от 10^{11} до 10^{14} Бк (от 2,7 до $2,7 \times 10^3$ Ки)
III класс	от 10^9 до 10^{11} Бк (от 0,027 до 2,7 Ки)

Помещения установки для работы с тритием, за исключением камеры токамака и систем инжекции топлива, предлагается локализовать в одном отдельном помещении, с независимой системой вентиляции. Работы, разрешенные в помещениях данного здания, будут соответствовать I, II и III классу работ (в соответствии

с нормируемыми параметрами). Наиболее радиационноопасные помещения (например, система разделения изотопов водорода) будут обеспечены дополнительными мерами безопасности.

Радиоактивные тритийсодержащие отходы. В рамках работы неэнергетических установок на настоящий момент не предполагается образование жидких и твердых радиоактивных отходов, содержащих тритий, в рамках нормальной эксплуатации систем. Образование твердых радиоактивных отходов связано с периодом вывода установки из эксплуатации и включает детали оборудования, подвергшиеся воздействию плазмы, загрязненные тритием в результате экспозиции в тритийсодержащей атмосфере и др. Данные отходы будут относиться к категории среднеактивных и низкоактивных, так как предполагается их частичная дезактивация в рамках работ по выводу объектов из эксплуатации.

В результате нештатных и аварийных ситуаций возможно образование твердых и жидких радиоактивных отходов. Однако основным видом радиоактивных отходов в данном случае будет являться газообразный тритий и его смеси с воздухом. Изолированные помещения (третий барьер для распространения трития) должны быть обеспечены системами для улавливания газообразного трития и его соединений для последующей переработки. К таким системам относятся: противоточные установки фазового изотопного обмена (колонны-скруберы), каталитические конверторы для окисления трития и его соединений, адсорбционные установки.

В рамках нормальной эксплуатации предполагаются потери до 1% трития, находящегося в топливном цикле в результате диффузии трития в конструкционные материалы, утечки в атмосферу и др. виды потерь. Большая часть трития задерживается в материалах первой стенки, обращенных к плазме, и конструкционных материалах токамака.

Для работы ТЯР и гибридных реакторов синтез-деления должны быть разработаны меры обращения с радиоактивными материалами из зоны деления, имевшими контакт с изотопами водорода (в том числе тритием), для них существующие требования, разработанные для реакторов деления, могут оказаться недостаточными в связи со спецификой работы с тритием.

10.1.2. Ограничение трития в подсистемах ТЦ ТЯР

Термоядерная установка состоит из различных подсистем ТЦ, и в качестве примера на рис. 10.4. показан концептуальный чертеж конфигурации термоядерной установки с твердотельным бланкетом-размножителем и водяным охлаждением. В каждой подсистеме химические формы и физические состояния входящего и исходящего трития часто значительно различаются. В этом разделе описываются методы удержания трития в каждой подсистеме со ссылкой на концепцию многоуровневой защиты с учетом выброса трития или утечки из первого, второго, третьего барьера-ограничителя и окончательного выброса в окружающую среду.

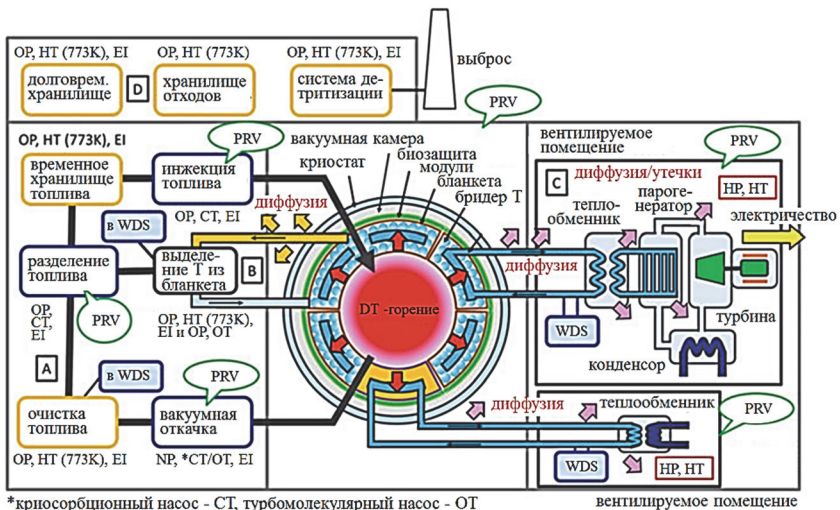


Рис. 10.4. Концептуальный чертеж конфигурации подсистем термоядерной установки с твердотельным бланкетом-размножителем и водяным охлаждением:

А – системы топливного цикла; В – система выделения трития из бланкета;

С – система выработки электроэнергии; D – другие системы;

WDS – система детритизации воды; NP – пониженное давление;

ОР – обычное давление; НР – высокое давление; СТ – криогенная температура;

ОТ – обычная температура; НТ - высокая температура; ЕИ – вакуумная изоляция;

PRV – объем аварийного сброса давления

Вакуумная камера токамака. Топливный цикл состоит из различных подсистем, соединенных трубопроводами, составляет первичную систему локализации трития. Все подсистемы ТЦ спроектированы так, чтобы утечка трития и проникновение за пределы подсистем были небольшими при их нормальной работе. Далее отмечаются возможные опасности для каждой подсистемы с точки зрения удержания трития.

Термоядерный источник нейтронов включает большой вакуумный объем (камеру), содержащий самый значительный запас трития, за исключением систем хранения изотопов водорода. Следовательно, чрезвычайно важно поддерживать целостность конструкции вакуумной камеры. В качестве первичной системы локализации вакуумная камера защищена от любого повреждения, вызванного аномальным событием со стороны плазмы, таким как разрушение, повышение давления, сопровождающееся разрывом охлаждающих трубок и повышением температуры из-за потери теплоносителя в системе охлаждения. Когда в качестве хладагента используется вода, необходимо учитывать требования безопасности при реакциях горячей воды с любыми материалами, используемыми в вакуумном объеме. Возможная аварийная ситуация – выброс активированной пыли при нарушении вакуума и загрязнение теплоносителя тритием при неполадках охлаждающих трубок.

Следует отметить, что использование жидкометаллического Li внутри вакуумной камеры может привести к накоплению значительного количества захваченного трития для некоторых температурных режимов металла. При проектировании установки необходимо обеспечить безопасную эксплуатацию систем циркуляции жидкого металла и выделения изотопов водорода из него при любых режимах работы установки и ее отдельных подсистем.

Системы вакуумной откачки. Криоконденсационные насосы и керамические турбомолекулярные насосы являются кандидатами для использования в системах вакуумной откачки. Для них накопление трития относительно велико, потому что все выхлопные газы, содержащие тритий, временно хранятся на панелях насоса при криогенных температурах. В системе должна быть обеспечена возможность аварийного сброса давления для предотвращения повышения давления из-за неисправности криогенных систем насосов.

Для промышленных реакторов ожидается разработка керамического турбомолекулярного насоса с большой выходной мощностью. Запасы трития в керамических турбомолекулярных насосах меньше, чем в крионасосах, поскольку тритий из вакуумной камеры непрерывно транспортируется в систему очистки топлива. На текущий момент возможно использование цельнометаллических турбомолекулярных насосов, производимых промышленно или с незначительными доработками. Для обоих типов систем вакуумной откачки вероятная утечка трития при их нормальной работе мала, потому что тритий обрабатывается при низкой/комнатной температурах.

Системы обработки топлива. Система очистки топлива должна быть изолирована от атмосферы. Тритий, проникающий в область пониженного давления, должен непрерывно удаляться и выделяться в системах детритизации. Для снижения рисков за счет вероятного отказа системы вакуумной изоляции, технологическое оборудование должно быть установлено в вентилируемом шкафу (перчаточном боксе).

В качестве системы разделения изотопов метод криогенной ректификации водорода является основным кандидатом из-за большой производственной мощности, запас трития в ней становится относительно большим. Корпус колонны должен быть изолирован с помощью вакуума для эффективного поддержания криогенной температуры. Требуется система аварийного сброса давления для предотвращения повышения давления из-за неисправности криогенной системы. Постоянная утечка или проникновение трития незначительны, потому что тритий обрабатывается при низкой температуре.

Системы хранения. T_2 , D_2 или DT , не используемые в ТЦ, хранятся в геттерных хранилищах на основе гидридов металлов и по мере необходимости транспортируются в топливные системы. Выделение изотопов водорода происходит при нагревании гидрида примерно до $500^{\circ}C$. Необходимо обеспечить защиту от разрушения вакуумной изоляции хранилищ и, учитывая большой запас трития, все модули хранилища должны быть размещены в вентилируемом шкафу (перчаточном боксе).

Системы инъекции. Системы подпитки включают газонапуск, инъекцию замороженных пеллет и инъекцию пучков быстрых атомов. Для системы газонапуска нет особых ограничений, связанных с температурой. Что касается системы впрыска пеллет, то гранулы замороженного T_2 и D_2 или DT должны производиться непрерывно при криогенных температурах. В системе инъекции пучков быстрых атомов криоконденсационный насос используется для поддержания высокого вакуума в объеме инжектора. В обоих этих системах потребуется система аварийного сброса давления для предотвращения повышения давления из-за неисправности криогенной системы.

Система бридинга трития. В твердом бланкете-размножителе парциальное давление трития в газе-носителе поддерживается на низком уровне, чтобы подавить проникновение трития в теплоноситель. Для снижения вероятности проникновения трития в атмосферу помещений может быть использована коаксиальная двухтрубная структура с откачкой газа из внешнего контура.

В случае жидкометаллического бланкета парциальное давление трития также будет невысоким для предотвращения проникновения трития через каналы теплоносителя и стенки бланкета.

Система долговременного хранения трития. При расширенном производстве трития на ТЯР с продвинутым бланкетом потребуется организовать долговременное хранение значительных количеств трития для внешних потребителей. При этом принципы хранения будут аналогичны описанным выше, но могут иметь отличия, связанные со спецификой решаемой задачи. Тритий стабильно сохраняется в сплавах для хранения водорода в виде гидрида. Количество трития в системе долговременного хранения не должно превышать 100 г для каждого помещения. Необходимо надлежащим образом управлять складскими площадками, чтобы их защитная ограничительная система не была разрушена какими-либо внешними факторами. Вероятно, площадку для долговременного хранения трития следует расположить вдали от тритиевого комплекса, чтобы предотвратить потерю большого количества трития в результате одной аварии.

Система детритизации воздуха/газов. Для детритизации загрязненной тритием атмосферы (воздуха) необходимо обеспечивать обработку значительных объемов воздушной смеси из помещений тритиевого комплекса в случае аварий или утечек трития в аномальных режимах работы подсистем ТЦ. При этом тритий, высвобожденный в рабочем пространстве при ненормальном событии, локализуется в замкнутой системе вентиляции. Система вентиляции должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить независимую от других помещений обработку воздуха или газа из перчаточного бокса. Суть метода заключается в окислении водорода на катализаторе и дальнейшей обработке воды, содержащей тритий. При таком подходе происходит концентрирование трития в обрабатываемой среде. Опыт эксплуатации систем детритизации может быть заимствован от АЭС, комбинатов по наработке трития и тритиевых лабораторий. Также необходимо обеспечить работу этих систем в различных аварийных случаях, особенно в случае пожара.

Детритизация загрязненной воды. Концентрация трития в загрязненной воде в нормальном режиме эксплуатации систем ТЦ термоядерной установки может находиться в очень широком диапазоне. Когда концентрация трития низкая, она исчерпывается разбавлением до тех пор, пока концентрация трития не станет ниже установленного предела. Когда концентрация трития высока, вода обрабатывается в системе детритизации. В ней тритий восстанавливается из загрязненной воды, а обработанная вода, все еще содержащая тритий с относительно низкой концентрацией, повторно используется на термоядерной электростанции.

Системы выработки электроэнергии. Тепло, генерируемое в ТЯР и переносимое теплоносителем, преобразуется в электрическую энергию для обеспечения собственных потребностей установки, а также для внешних потребителей. При этом контуры охлаждения различных компонентов ТЯР будут отличны из-за различных условий теплосъема и радиационной обстановки. Тем не менее, существует вероятность утечки трития в теплоноситель и транспорта его к турбинам в системе выработки электроэнергии. Следовательно, подавление проникновения трития в теплоноситель каждого контура является наиболее эффективной контрмерой для предотвращения загрязнения тритием системы выработки электроэнергии.

10.1.3. Структура здания ТЯР

На рисунке 10.5. показан концептуальный чертеж здания термоядерной установки с размещением основного оборудования. Рисунок иллюстрирует концепцию многоуровневой защиты для термоядерного объекта. Корпус реактора является одним из основных ограничителей, а бетонные стены здания – вторичным ограничением. Горячие камеры для технического обслуживания и ремонта, а также системы обработки трития в качестве компонента топлива независимо размещаются в соседних зданиях, построенных из бетона, чтобы обеспечить многократную изоляцию.

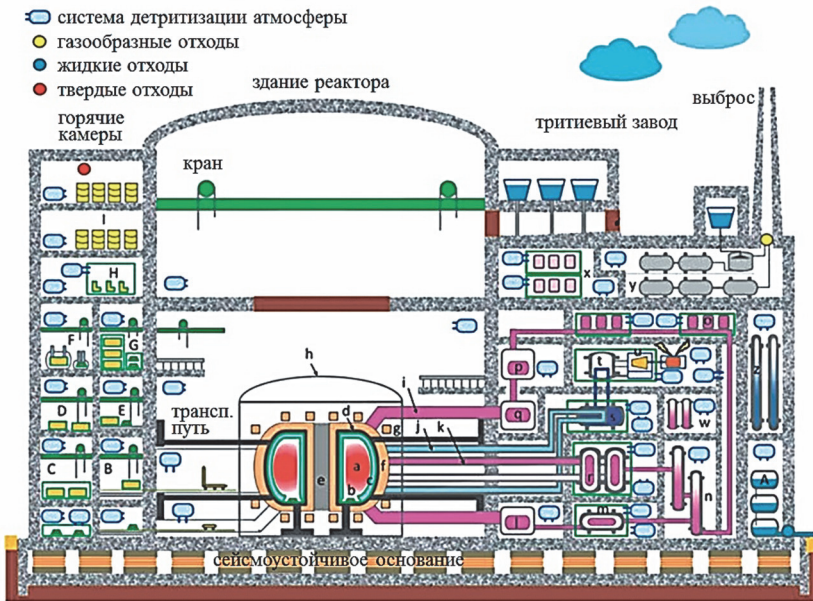


Рис. 10.5. Концептуальный чертеж здания термоядерной установки:

- a – плазма; b – дивертор; c – бланкет; d – вакуумная камера;
- e – центральный соленоид; f – тороидальные катушки; g – полоидальная катушка;
- h – криостат; i – магистрали топливного цикла; j – магистрали с теплоносителем;
- k – магистрали носителя трития из бланкета; l – вакуумные насосы;
- m – очистка топлива; n – разделение изотопов; o – тритиевое хранилище временное;
- p – регулятор состава; q – топливная инжекция; r – выделение трития из бланкета;
- s – теплообменник; t – парогенератор; u – турбина;
- w – детритизация воды (высокий уровень); x – тритиевое хранилище долговременное;
- y – система детритизации; z – детритизация воды (низкий уровень);
- A – резервуар для воды; B – удаление пыли; C – удаление трития;
- D – временное хранилище; E – техническое обслуживание; F – контроль;
- G – подготовка; H – подготовка отходов; I – хранение отходов

Установка должна быть размещена в здании, имеющем большой объем и высокие потолки, поскольку для сборки и ремонта реактора необходим кран. Горячие камеры целесообразно располагать в виде многоярусной конструкции. Размеры и вес компонентов, которые будут перемещаться в здание горячей камеры, уменьшаются от нижних к верхним этажам. В технологическом здании тритиевого комплекса должны располагаться все подсистемы для рециркуляции, хранения и детритизации топлива в герметичных помещениях.

Некоторые подсистемы, в которых может происходить утечка определенного количества трития в нормальном режиме работы, дополнительно должны содержаться в герметичном металлическом перчаточном боксе. В каждой комнате установлены независимые мониторы трития. Поскольку система детритизации воды представляет собой крупногабаритное оборудование, имеющее резервуар для воды, расположенное сверху колонн, его может быть целесообразно установить в соседнем отдельном здании. В результате очистки, после подтверждения того что концентрация трития и доза облучения ниже нормативного предела, воздух/газ могут быть выброшены в атмосферу посредством дымовой трубы.

При нормальной работе существует три вида путей, которыми тритий потенциально может покинуть объект и попасть в окружающую среду. Первый – это выброс газообразных отходов из дымовой трубы, второй – удаление воды, используемой или образующейся в тритиевом комплексе, и третий – удаление твердых отходов. Как упоминалось в предыдущем разделе, существуют установленные регламентом предельные значения, которые для соединений НТ в воздухе составляет 70 Бк/см^3 , для НТО в воздухе – $0,005 \text{ Бк/см}^3$, предел для трития в сбрасываемой воде составляет 60 Бк/см^3 , а предел для твердых отходов/веществ составляет 4 Бк/см^2 (в Японии). Сброс отходов в окружающую среду должен осуществляться под строгим контролем при соблюдении установленных норм.

Поскольку для термоядерной установки возможна необходимость обработки большого количества загрязненной тритием воды (в результате охлаждения всех подсистем и процедуры детритизации воздуха в помещениях), производительность систем должна выбираться на случай аномальных событий или серьезных аварий –

для предотвращения выброса загрязненной воды в окружающую среду. В этом отношении критически важно поддерживать прочность конструкции здания для радиационной защиты населения и окружающей среды. Конструкция должна быть сейсмоустойчива, особенно для размещения в местах с высоким уровнем сейсмической активности. Конструкция здания должна быть рассчитана, в том числе, на повышение давления в результате вытекания теплоносителя с образованием пара/газа. Большое пространство внутри здания установки может эффективно компенсировать рост давления при таком сценарии. В конструкции здания может потребоваться функция аварийного сброса воздуха. Чтобы предотвратить выброс радиоактивных материалов, таких как тритий или активированный Ne/Ar и пыль, следует оборудовать скрубберы в системе вентиляции.

Укладка глины или адсорбента, обладающего высокой способностью к обмену изотопов водорода, в окружающей почве может быть эффективной мерой против проникновения трития в землю на территории объекта. Распространение трития в почве можно уменьшить путем немедленного восстановления глины или слоя адсорбента после аварии с утечкой трития.

10.1.4. Содержание трития в ТЯР

Поскольку количество запасов трития на площадке установки напрямую определяет безопасность (тритиевую) на термоядерной установке, их оценка и сокращение в соответствии с концепцией ALARA критически важны. Текущая оценка запасов трития на термоядерном реакторе ДЕМО составляет около 1 кг в вакуумном объеме, в системах топливного цикла и горячих камерах и до 15 кг в долговременном хранилище, в то время как в ИТЭР эти оценки составляют от 330 до 700 г в вакуумной камере (компоненты, обращенные к плазме, пыль, пленки и т.д.), 120 г в криоконденсационных насосах, 55 г в системах инъекции топлива (пеллет-инъекции – 45 г и газонапуска – 10 г), 30 г в системах очистки топлива, 220 г в системе разделения изотопов, 10 г в системе детритизации воды и 200 г в горячей камере. Предполагается, что максимальная утечка трития

в здании токамака составит 70 г, а максимальный выброс трития из трубы в окружающую среду оценивается как менее 7 г в предположении, что извлечение трития из воздуха помещений составит 90% или более. После такого выброса годовое радиационное облучение населения на границе площадки ИТЭР может быть уменьшено до уровня ниже 1 мЗв, что является рекомендуемым значением ICRP. Кроме того, МАГАТЭ рекомендует установить предел аварийного облучения населения на уровне 50 мЗв/нед.

Основное различие запасов трития ИТЭР и термоядерной электростанции ДЕМО связано с долговременным хранилищем, которое в последней значительно больше. Поскольку долговременное хранилище должно быть отделено от здания реактора, риск, вызванный утечкой трития при нормальной эксплуатации, не сильно различается между ними (ИТЭР и ДЕМО). Случайный выброс трития в окружающую среду полностью зависит от возможного сценария. Для неэнергетических установок (например, термоядерных источников нейтронов – ТИН) количество трития на площадке ожидается меньше чем для ИТЭР, однако стационарный режим работы установки будет вносить специфику в требования по безопасности. В любом случае установка должна быть спроектирована таким образом, чтобы облучение населения на границе площадки было ниже значения, рекомендованного международными организациями, такими как ICRP и МАГАТЭ.

10.2. Топливный цикл ИТЭР и радиационный мониторинг

ИТЭР – это экспериментальный токамак, однако системы топливного цикла должны основываться на проверенных технологиях, строиться и эксплуатироваться таким образом, чтобы все составляющие обладали высокой надежностью. В частности, необходимо обеспечить безопасное обращение с тритием и его удержание при любых условиях работы ИТЭР – для развития термоядерной энергетики в качестве надежного ресурса. Технические характеристики систем, обеспечивающих подачу топлива, откачку газов из вакуумной камеры, извлечения изотопов водорода из газовой смеси и их

разделения до требуемого уровня, а также детритизации водных и воздушных потоков должны соблюдаться с самого начала эксплуатации и для всех режимов работы ИТЭР.

Контроль содержания гелия и примесей в термоядерной плазме требует непрерывного извлечения газов их вакуумной камеры потока нейтрального газа в диверторе и, следовательно, непрерывной подачи свежего топлива системами инъекции. ИТЭР в конечном итоге потребует перерабатывать около 200÷400 кг трития в год при уровне запасов около 2 кг. На более поздних этапах эксплуатации в DT-кампании оборот трития на несколько порядков превысит показатели любого тритиевого завода-предшественника в мире. Дополнительные сложности возникают из-за требований к разделению изотопов водорода, из-за необходимости извлечения трития из воды, обогащенной тритием, и из-за детритизации газов перед их сбросом в атмосферу.

Системы переработки и удержания трития, расположенные в здании тритиевого завода ИТЭР, являются крупной установкой, не имеющей аналогов во всем мире. Системы топливной инъекции играют ключевую роль в надежном контроле плотности основной плазмы и режима работы дивертора с заданными тепловыми нагрузками на компоненты. В том числе, это достигается за счет инъекции вспомогательных газов. Впрыск топливных пеллет является основным инструментом для подачи топливных частиц глубоко внутрь плазмы с высокой эффективностью доставки. Еще одной важной задачей, решаемой с помощью инъекции пеллет, является контроль частоты локализованных периферийных мод и предотвращение повреждения компонентов первой стенки.

Тритий для работы ИТЭР будет поступать из внешних источников. По крайней мере, 20÷25 кг коммерчески-доступного трития может быть доступно на этапе DT-кампании за счет его извлечения из реакторов деления с замедлением на тяжелой воде. Безопасно хранящиеся в виде гидрида металла (тритида) тритий и дейтерий будут подаваться в системы топливной инъекции по мере необходимости и вводиться в вакуумную камеру с помощью пеллет-инъекции и газонапуска (рис. 10.6).

Выхлопные газы из плазмы непрерывно откачиваются и обрабатываются для извлечения трития и детритизации, а разделение изотопов замыкает топливный цикл.

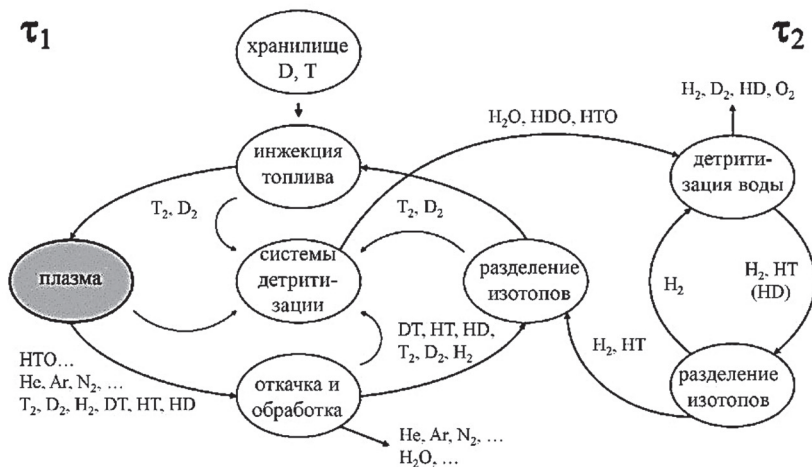


Рис. 10.6. Замкнутый топливный цикл ИТЭР

Оборот дейтерия и трития в системах ТЦ может характеризоваться некоторым временем пребывания в системах (в соответствии со скоростями физико-химических процессов в них). При этом архитектура ТЦ строится таким образом, чтобы максимизировать газовую нагрузку на системы с коротким временем пребывания и, напротив, снизить ее на системы с длительным временем пребывания газа. Суммарный запас трития в ТЦ будет формироваться из накопления в системах с быстрой рециркуляцией топлива τ_1 и значительными потоками (и концентрациями трития в них), а также в системах с длительной рециркуляцией τ_2 , существенно меньшими потоками газа и следовыми количествами трития. Оптимизация потоков в системах и подбор технологических решений для них является важной задачей проектирования, особенно для сокращения запасов трития на тритиевом заводе установки.

Тритийсодержащие системы в ИТЭР обычно ограничены более чем одним физическим барьером. Системы обработки, например, размещены в перчаточных боксах, а атмосфера в перчаточных боксах об-

служивается системой очистки. Таким образом, тритий из-за проникновения, утечек в системах и десорбции во время технического обслуживания или инцидентов/аварий улавливается путем окисления до воды с последующим улавливанием (тритиевой) воды. Так как атмосфера в здании установки и тритиевого завода может содержать тритий в результате утечек, пространство зданий разделено на изолирующие сектора.

10.2.1. Системы безопасности установки ИТЭР

Проектирование систем вентиляции для комплекса токамака ИТЭР основано на опыте и практике установок по производству трития и требований к ограничению и руководящих принципов для ядерных установок. Подробно это обсуждалось выше по тексту и проиллюстрировано на рис. 10.3.

На рисунке 10.7 приведен пример реализации подхода многоконтурной системы удержания для системы разделения изотопов (ISS). Атмосфера перчаточных боксов обрабатывается системой детритизации (GDS), тем самым обеспечивая изоляцию от внешней среды не только с помощью физического барьера, но и за счет улавливания и удаления распространяющегося трития. За счет поддержания давления ниже атмосферного в помещениях тритиевого завода обеспечивается дополнительное удержание. В случае попадания трития в помещения в аварийном сценарии, системы обогрева, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) этих помещений автоматически отключаются с помощью датчиков трития в системе вентиляции (VDS). Давление в данных помещениях поддерживается ниже, чем в HVAC, а воздушные потоки обрабатываются VDS перед сбросом в окружающую среду. Никакие газы из систем переработки трития не сбрасываются в атмосферу без предварительной обработки VDS.

На рисунке 10.8 показана условная схема организации многоуровневой защиты для ИТЭР. Система детритизации (DS) обеспечивает как функцию удаления трития из воздушных потоков в системе вентиляции (VDS), так и функцию детритизации атмосферы помещений (ADS). Данные системы организованы различным

образом. Так, для VDS реализуется однопроходная схема, в то время как в ADS реализована рециркуляция потоков. Подаваемые воздушные потоки можно разделить на три категории: Тип 1, Тип 2 и Тип 3. Примерами потоков 1 типа являются галереи или помещения в здании тритиевого завода. При нормальной эксплуатации эти помещения обслуживаются системой кондиционирования, в случае загрязнения тритием система HVAC будет изолирована, а система DS обеспечит контроль давления ниже атмосферного и их вентиляцию. Системы обработки тритийсодержащих газов, такие как система откачки токамака, требуют детритизации потоков из системы вентиляции и относятся ко 2 типу, в то время как 3 тип относится к объемам, которые при определенных условиях эксплуатации требуют детритизации как потоков из системы вентиляции, так и детритизации атмосферы помещений.

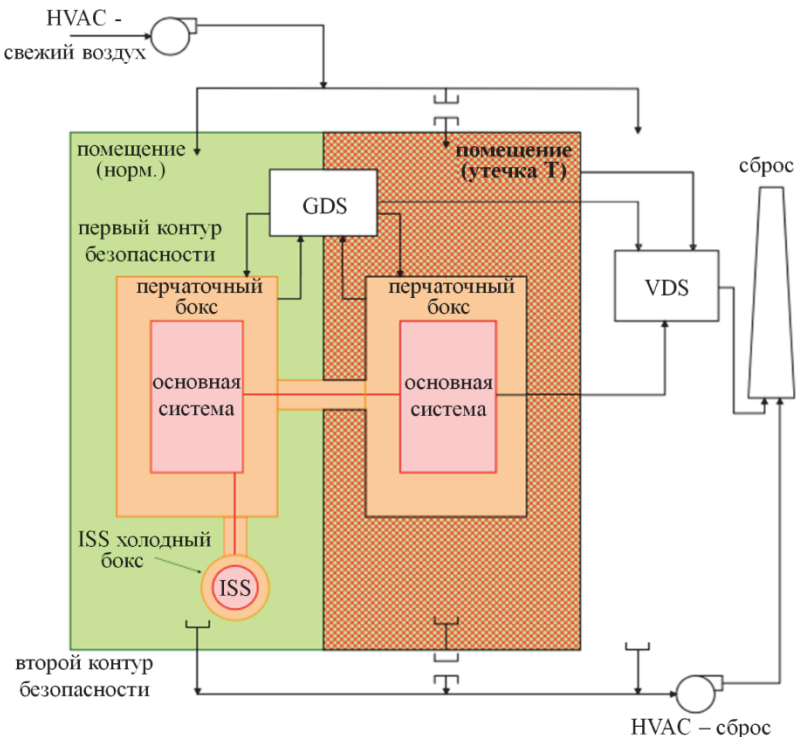


Рис. 10.7. Концептуальная схема системы вентиляции ИТЭР

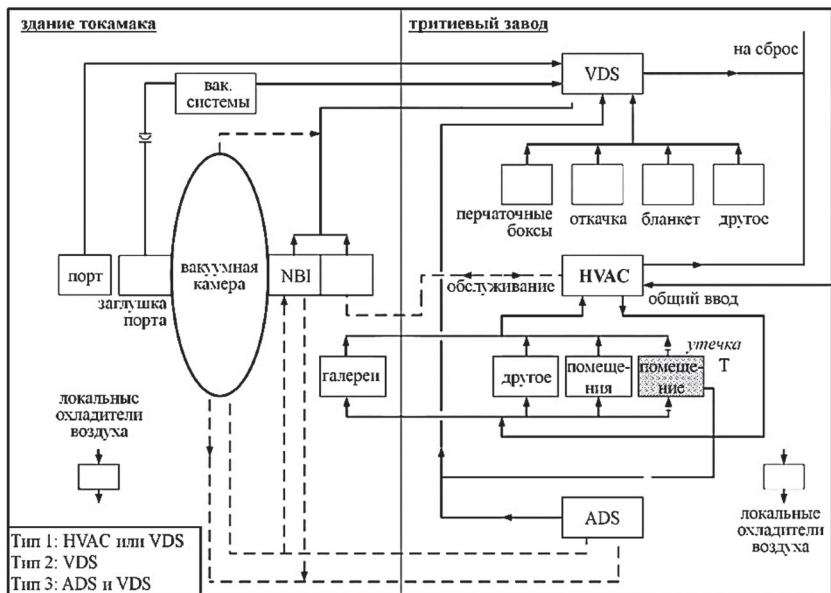


Рис. 10.8. Условная схема организации многоуровневой защиты

10.2.2. Системы газоснабжения

Блок-схема топливного цикла ИТЭР показана на рис. 10.9. Комплекс инжекции изотопов водорода в вакуумную камеру включают в себя системы распределения газовых потоков (GDS), газовой инжекции (GIS), инжекции пеллет (PIS), распределения газовых потоков для инжекторов нейтральных пучков (NB) и диагностических нейтральных инжекторов (DNB), гашения разряда (FPSS) и смягчения последствий срывов (DMS). Газонапуск используется как для формирования условий работы дивертора в разрядах с плазмой, так и для подачи газов при очистке стенок вакуумной камеры.

Все газы подаются в различные системы подачи с тритиевого завода установки. Системы ввода топлива в вакуумную камеру выделены одним цветом на блок-схеме (рис. 10.9).

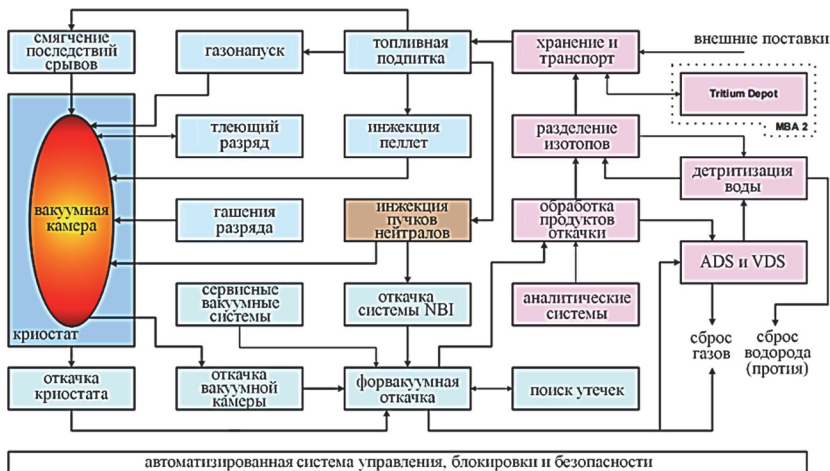


Рис. 10.9. Блок-схема топливного цикла ИТЭР

Система распределения газа. Эта система обеспечивает подачу всех необходимых для плазменного разряда газов, поступающих из системы хранения и доставки (SDS) тритиевого завода. Для подачи газов в вакуумную камеру используются шесть газовых линий, включая GIS и PIS; еще две линии подают газы для нейтрализаторов и источников пучка инжекторов NB и DNB. Предусмотрена общая линия откачки, позволяющая удалять газы из различных элементов систем газоснабжения тритиевого завода, когда они не функционируют, для перекачки и продувки трубопроводов перед переключением на другой газ, а также для проверки распределительных систем в нерабочее время. Система откачки и обработки выхлопных газов токамака обеспечивает эти функции. Газы, подаваемые в различные системы, поступают из общего коллектора, который проходит от тритиевого завода в различные точки распределения вокруг биологической защиты токамака.

Магистраль GDS соединяют здание тритиевого завода и здание токамака на экваториальном уровне установки. Одна магистраль поднимается до уровня верхнего порта и подает газы в четыре распределительные коллектора газовых клапанов (GVB). Одна магистраль спускается на уровень порта откачки, обеспечивая подачу газов к трем GVB для GIS и шести GVB для PIS (рис. 10.10).

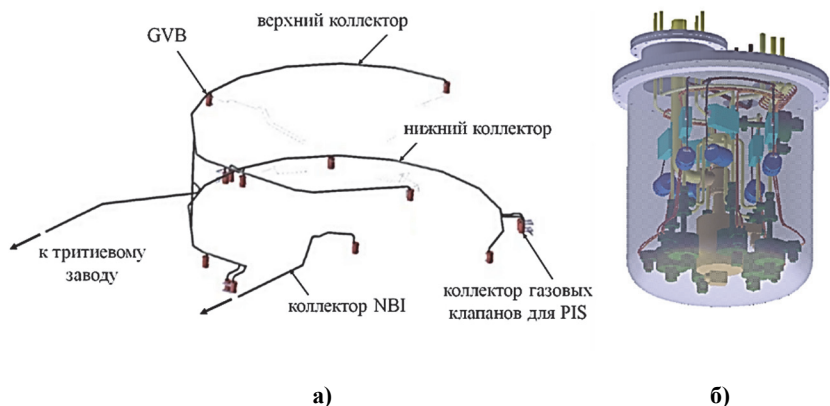


Рис. 10.10. Схема газовых магистралей вокруг установки в здании токамака (а), коллектор газовых клапанов (GVB) (б)

Магистралы для подачи газа содержат одну линию для подачи трития, две линии для протия и дейтерия и три линии подачи примесных газов (обычно аргона, неона и гелия). Размеры линий рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить максимальную скорость подачи газа в количестве $222 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\text{с}^{-1}$ для смеси 90% T_2 /10% D_2 (что эквивалентно $200 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\text{с}^{-1}$ чистого трития), $400 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\text{с}^{-1}$ для водорода и дейтерия и $100 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\text{с}^{-1}$ для всех примесных газов при давлении 0,09 МПа. Все вышеуказанные линии подачи проложены в общей защитной трубе: наружный диаметр которой 270 мм, а давление внутри 0,6 МПа. Внутреннее пространство защитной трубы активно контролируется на предмет наличия как внутренних, так и внешних утечек.

В дополнение к вышесказанному, две линии используются для подачи газообразных водорода и дейтерия к инжекторам NB и DNB под давлением 0,6 МПа и для обеспечения максимального расхода $125 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\text{с}^{-1}$ для водорода и $70 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\text{с}^{-1}$ для дейтерия.

Система газовой инжекции. Во время плазменных операций с H, D, DT и He плазмой потребуются GIS для обеспечения начального заполнения газом пространства вакуумной камеры перед иницированием разряда и созданием плазмы, а также подачи газа во время подъема плотности плазмы, контроля плотности плазмы во

время стационарного горения, контроля пристеночной плазмы и обеспечение управления тепловым потоком в диверторе путем радиационного охлаждения (посредством примесных газов). Система позволит вводить до шести газов одновременно и, как правило, будет использоваться для трех водородных соединений и трех примесных газов (например, аргона, неона и гелия).

Для обеспечения гибкости режимов работы установки, инжекция газа в вакуумную камеру будет осуществляться в верхней части вакуумной камеры (верхний порт GIS) и в районе дивертора (диверторная GIS). Для минимизации эрозии первой стенки за счет обмена зарядами (СХ) при распылении впрыскиваемый газ будет равномерно распределен тороидально в четырех областях в верхнем сечении. Трубы для газонапуска в верхней части установки заканчиваются за модулями бланкета, и газ будет поступать в камеру через полоидальные щели ($\sim 1 \div 2$ м в длину) для обеспечения равномерного потока и уменьшения локальной эрозии из-за распыления СХ.

Верхний порт GIS включает четыре коллектора газовых клапанов, равномерно распределенных в верхних портах установки № 4, 9, 14 и 18 с внешней стороны биологической защиты. Газораспределительные коллекторы GVB имеют внешний корпус диаметром 0,51 м и высотой 0,66 м (рис. 10.10б), являющийся защитой от магнитного поля $\sim 0,1$ Тл, присутствующего в этом месте. Расположение клапанов внутри корпуса позволяет независимо инжектировать до шести газов, которые поступают в общую магистраль для напуска в вакуумную камеру через линию диаметром 10 мм. Запорный клапан на 0,12 МПа используется для изоляции этого коллектора от линии, соединенной с вакуумной камерой, а дополнительный запорный клапан соединяет коллектор с линией откачки и промывки, что позволяет прокачивать и промывать каждую линию подачи газа перед тем как перейти на другой газ. Это также позволяет проводить испытания на газонапуск для каждого вида газа во время ввода в эксплуатацию без использования вакуумной камеры (запорный клапан вакуумной камеры закрыт, запорный клапан вакуумной линии открыт).

В двух из четырех блоков клапанов GIS в верхнем порту встроена система гашения разряда (FPSS) (рис. 10.9). Газовая магистраль направляется от блоков клапанов через защитную трубу к верхнему порту, где он проходит по внутренней стороне порта и заканчивается за модулем blankets, примыкающим к порту. Длина линии напуска от блоков клапанов до области за модулем blankets составляет ~15 м, что позволяет достичь времени отклика системы ~ 500 мс.

Планируется шесть специализированных GVB для PIS в дополнение к GVB для GIS после модернизации PIS, которые обеспечат топливные или примесные газы для производства пеллет и газа-вытеснителя для ускорения пеллет. В диверторных портах № 7, 13 и 18 будут установлены два GVB. В связи с ограниченным пространством в диверторных портах № 6 и 12 (где установлены системы PIS) для размещения GVB были выбраны порты № 7 и 13.

На уровне дивертора газ нагнетается в область дивертора под куполом и в каналы дивертора, как показано на рис. 10.11.

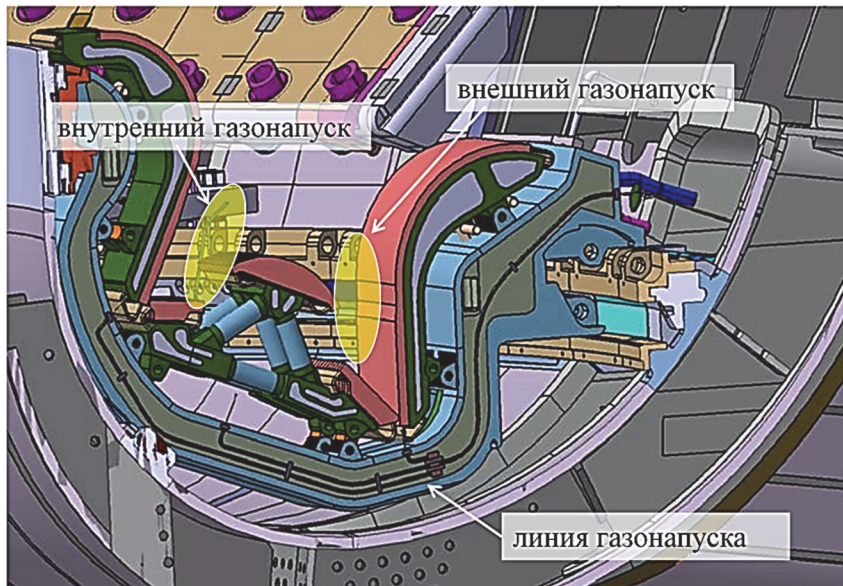


Рис. 10.11. Область газонапуска в диверторной зоне

Поскольку потоки за счет рециклинга в этой области намного ниже, локальная эрозия из-за распыления СХ не является проблемой, что позволяет выбрать только три тороидальные точки инъекции в этом месте, а именно порты дивертора № 6, 12 и 18. За исключением FPSS и газовых магистралей диверторная GIS идентична основной GIS в верхнем порту.

GIS также используется для инъекции всех газов, необходимых для операций очистки стенок вакуумной камеры. Во время их очистки в тлеющем разряде GIS работает совместно с вакуумной насосной системой и обеспечивает пропускную способность $< 50 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ по протиию, дейтерию или гелию – для удаления примесей. Если требуется обработка стен газами (например, для удаления соосаженных слоев), то для подачи этого газа будет использоваться одна из примесных линий или запасная линия.

Система гашения разряда (FPSS). Возможность инъекции неона в вакуумную камеру необходима для обеспечения управляемого гашения плазменного разряда в течение $\sim 3 \text{ с}$, чтобы ограничить температурные колебания первой стенки и/или бланкета в случае потери теплоносителя.

Прекращение термоядерной реакции в течение этого времени может быть удовлетворено выделением $\sim 40 \text{ Па}\cdot\text{м}^3$ газа в вакуумную камеру. Два из четырех GVB верхнего порта содержат баллоны объемом 10^{-3} м^3 , заполненные газообразным неоном при давлении 0,09 МПа. Одного баллона достаточно для прекращения разряда; таким образом, FPSS имеет 100% резервирование. Содержимое каждого баллона изолируется от вакуумной камеры во время нормальной работы с помощью клапана отказоустойчивого открытия, управляемого центральной системой безопасности (CSS), и в любом случае открывается при давлении 0,2 МПа.

Газовый баллон, запорный клапан, входной клапан и продувочный клапан составляют отдельный механический узел FPSS. Запорный клапан соединяет газовый баллон со специальным 10-миллиметровым выпускным коллектором GIS. Каждый газовый баллон заряжается с помощью входного клапана, подключенного к общему подающему коллектору. Клапан очистки соединяет газовый баллон с общей линией перекачки и промывки для GIS, позволяя перекачивать и промывать баллон перед заполнением.

Система впрыска пеллет. Система впрыска пеллет (PIS) рассчитана на расход газа $111 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ для 90% T_2 /10% D_2 пеллет, что составляет $100 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ чистого трития и $120 \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ для дейтерия в виде пеллет (гранул) диаметром $3\div 6$ мм. При этом размер топливных пеллет выбирается таким образом, чтобы ограничить отклонения плотности плазмы (и мощности термоядерного синтеза) не более чем на 10%. Максимальная частота повторения варьируется от 4 Гц для гранул толщиной 6 мм до 15 Гц для гранул толщиной 3 мм и доступна для длительности разряда до 3000 с. Скорость гранул до 300 мс^{-1} со стороны сильного магнитного поля (HFS) считается необходимой для проникновения вглубь плазменного шнура ($> 15\%$ от малого радиуса).

На установке будут размещены два инжектора, обеспечивающие не только оперативное резервирование, но и гибкость использования одного из инжекторов для подачи гранул примесей для физических исследований. Предусматривается модернизация PIS в конфигурации с шестью инжекторами для работы с плазмой в DT-кампании. Каждый инжектор гранул будет способен работать в установившемся режиме и будет состоять из следующего основного оборудования (рис. 10.12.):

- пневматический инжектор газовой пушки для подачи пеллет;
- двухшнековый экструдер для производства пеллет;
- система подачи газа, подключенная к GVB для PIS;
- корпус инжектора пеллет в котором размещается инжекторный узел (длина $\sim 5,5$ м, высота 3,2 м, ширина 2,6 м);
- три пролетные трубки на каждом порте дивертора (две со стороны сильного поля (HFS) и одна со стороны слабого поля (LFS)), соединенные через порт дивертора с вакуумной камерой;
- система диагностики, контроля и сбора данных.

Корпус для инжектора пеллет аналогичен боксам для удаленной обработки и будет перемещаться пневматически, чтобы обеспечить транспортировку в горячую камеру и обратно для обслуживания. Корпус-контейнер обеспечивает герметизацию всего оборудования, находящегося внутри, и будет рассчитан на давление 0,12 МПа. Порты диверторного уровня № 6, 12 и 18 предназначены для инжекторов пеллет: два для использования с начала работы установки и третий

(полностью оборудованный за исключением инжектора) – для возможного использования в будущем. Все коммуникации: топливные газы, газ-вытеснитель (пропеллент), криогенные материалы, сервисный вакуум и электрические соединения смонтированы на задней части контейнера, что позволяет выполнять монтаж вручную.

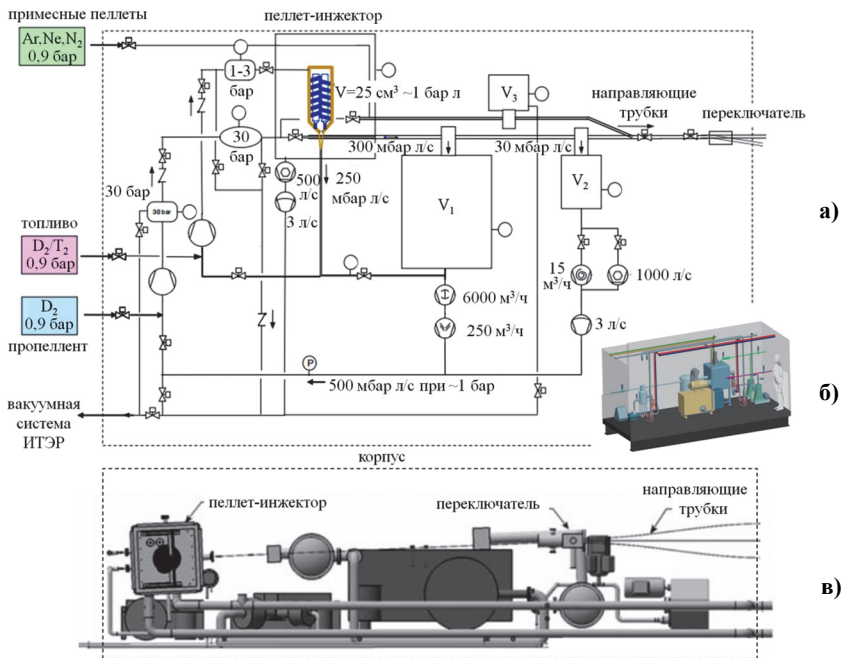


Рис. 10.12. Принципиальная технологическая схема системы инъекции:
а – пеллет ; б – общий вид; в – вид сверху

Каждый инжектор имеет специальную насосную систему, которая поддерживает высокий вакуум в экструдере, ускорителе газовой пушки и пролетной трубе. Защитный вакуум инжектора создается специальной вакуумной насосной системой. Газ-вытеснитель – протий для противевых таблеток и дейтерий для дейтерия или трития – расширяется в два балластных бака (V₁ и V₂ на рис. 10.12) и извлекается серией вакуумных насосов. Восстановленные газы будут компримироваться в резервуар-накопитель под давлением 3 МПа

и снова использоваться. Газ-вытеснитель из резервуара будет перерабатываться тритиевым заводом в ночные смены для удаления трития. Неиспользованный лед от пеллет плавится электрическим нагревателем в нижней части экструдера и отправляется обратно в небольшой резервуар для повторного использования. Данная схема реализована для снижения газовой нагрузки на тритиевый завод и запасов трития в топливном цикле.

Направляющие трубки диаметром 10 мм заходят в криостат под корпусом крионасоса и выходят в вакуумную камеру через порты дивертора. Направляющая трубка HFS выходит в вакуумную камеру в зазоре между двумя модулями бланкета, повторяя геометрию вакуумной камеры под диверторной кассетой. Направляющая трубка LFS проходит через опору вакуумной камеры и выходит через зазор между модулями бланкета, как показано на рис. 10.13.

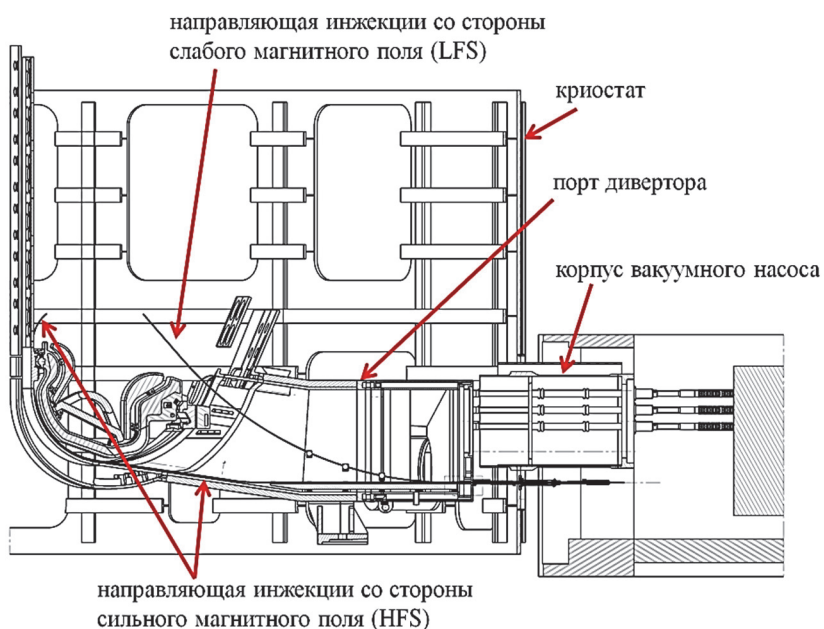


Рис. 10.13. Схема направляющих трубок для инъекции со стороны слабого (LFS) и сильного (HFS) магнитного поля

Снаружи криостата направляющая трубка находится внутри защитной трубы, заканчивающейся блоком газовых клапанов с номинальным давлением 0,12 МПа, в которой находится один запорный клапан с номинальным давлением 0,12 МПа.

Очистка стенок вакуумной камеры. Очистка стенок вакуумной камеры в тлеющем разряде будет использоваться перед разрядом в плазме для удаления воды, кислорода и других загрязнений со стенок, обращенных к плазме, для очистки вторичных поверхностей, непосредственно не взаимодействующих с плазмой, но являющихся потенциальными источниками загрязнения плазмы, а также для уменьшения рециркуляции изотопов водорода со стенок (десорбции) во время разряда и для минимизации накопления трития в вакуумной камере путем удаления осажденных слоев. Процесс очистки включает прогрев внутрикамерных компонентов до 240°C и дивертора до 350°C и очистку тлеющим разрядом (GDC) с использованием дейтерия и гелия без тороидального поля и электронного циклотронного резонанса или ионного циклотронного резонанса с тороидальным полем.

Прогрев будет производиться после сброса давления в вакуумной камере до атмосферного. Внутрикамерные компоненты будут нагреты до 200°C, температура модулей blankets поддерживается на уровне 240°C и до 350°C для дивертора за счет системы охлаждения/нагрева. Прогрев будет осуществляться в течение ~ 100 часов, пока общее давление примесей не упадет до $< 10^{-3}$ Па. По завершении операции прогрева компоненты в вакуумной камере будут охлаждены до рабочей температуры ~ 100°C, что приведет к общему давлению для примесей $< 10^{-7}$ Па и $< 10^{-5}$ Па для изотопов водорода.

Основываясь на опыте современных токамаков, для эффективного удаления поверхностных загрязнений для тлеющего разряда потребуется плотность тока $> 0,1 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$. Необходимо обеспечить адекватное пространственное распределение для достижения необходимой тороидальной однородности тока. Кроме того, необходимо избегать распыления поверхностей, особенно вблизи электрода, и распыления самого электрода. Для ИТЭР с доступной площадью поверхности ~ 845 м² выбрано шесть электродов, выходящих за пределы поверхности, обращенной к плазме, на ~ 1,25 м,

каждый из которых работает при токе до 30 А. Питание электродов будет осуществляться от источника постоянного тока ~ 1 кВ. Рабочее давление в вакуумном сосуде во время разряда составляет $\sim 0,1 \div 0,5$ Па, а рабочими газами будут водород и дейтерий для удаления примесей и гелия, для дегазации компонентов, обращенных к плазме.

Электроды GDC работают как защитные заглушки во время работы с плазмой, закрывая отверстие в модуле blankets. Тепло, выделяющееся при работе с плазмой, и омическое тепло, выделяемое при работе в режиме очистки стенок, отводятся петлей охлаждения дивертора. Для проведения операции очистки электроды вводятся в плазменную камеру с помощью специальных транспортеров.

Требуемая мощность электрон-циклотронного (ЭЦ) резонансного разряда для очистки стенок оценивается примерно в 1 МВт. Изменение тороидального поля в диапазоне от 4 до 5,7 Тл между последовательными разрядами позволяет передавать резонанс ЭЦ по всей вакуумной камере. Рабочее давление во время ЭЦ разряда находится в диапазоне от 0,01 до 0,1 Па, а рабочими газами, которые будут использоваться, являются дейтерий, гелий или другие газы. В работе ИТЭР ЭЦ-разряд может использоваться между плазменными разрядами в случае необходимости.

Система нагрева ионного циклотронного (ИЦ) резонансного разряда может использоваться для очистки камеры и потребует мощности около 1 МВт. Рабочее давление для ИЦ-разряда составляет от $\sim 0,01$ до 0,1 Па, а рабочими газами являются гелий или дейтерий. Использование ИЦ-разряда с газообразным гелием является потенциальным кандидатом для очистки стенок камеры между выстрелами для удаления слабосвязанных частиц водорода на компонентах, обращенных к плазме.

ИЦ-разряд также был предложен в качестве метода очистки в сильных магнитных полях, где высокоэнергетический нейтральный гелий будет создавать атомы с энергией от 300 до 400 эВ. В этом диапазоне энергий выход десорбции имплантированных частиц водорода из компонентов, обращенных к плазме, выше, чем у GDC. Однако этот механизм, вероятно, недостаточен для удаления трития в осажденных слоях.

10.2.3. Детритизация

Еще одной уникальной особенностью ИТЭР является то, что тритированная вода, образующаяся в системах детритизации воздушных потоков или из других источников, не выбрасывается в отходы, а перерабатывается для удаления трития. Это нельзя сравнить с детритизацией, используемой в реакторах деления с замедлителем из тяжелой воды. В то время как тяжелая вода возвращается обратно в контур после удаления трития, продукты детритизации воды в ИТЭР должны быть практически свободны от трития для сброса в окружающую среду. Поэтому детритизация воды в ИТЭР должна быть реализована с коэффициентом, по крайней мере, на пять порядков выше. Данная проблематика подробно рассмотрена в п. 10.1.

Извлечение трития из тритированной воды, в конечном итоге, достигается за счет прямой связи детритизации воды с разделением изотопов водорода. Этот цикл характеризуется постоянной времени $\tau_2 > \tau_1$ (рис. 10.6), но при этом общий запас трития в ИТЭР сохраняется в предусмотренных пределах.

Заключение

Топливный цикл ИТЭР должен будет перерабатывать тритий с беспрецедентными объемными расходами – примерно на один-два порядка выше, чем когда-либо ранее достигалось. Это создает, например, проблемы с учетом трития или распространением ошибок в измерениях запасов, связанных с большими объемными расходами. Измерения трития, захваченного в вакуумной камере, например в пыли, а также удаление и извлечение трития из вакуумной камеры является одной из серьезных проблем. В связи с нормативными требованиями, связанными с выбросами трития, необходимо обеспечить детритизацию атмосферы помещений на небывалом ранее уровне, чтобы обеспечить безопасность персонала, населения и окружающей среды.

Тритиевый завод использует проверенные технологии обращения с тритием для решения задач разделения, хранения и инъекции топлива. Однако для целого ряда систем, в первую очередь систем

выделения малых количеств трития из воды и атмосферы, должны быть продемонстрированы масштабы систем выше, чем были реализованы ранее. Ряд технологий обработки и подготовки компонентов топлива находятся на стадии разработки – для масштабирования систем и обеспечения требуемых параметров. Действующая программа НИОКР должна продемонстрировать достижение выбранными технологиями уровня готовности, при котором они могут быть использованы в топливном цикле и соответствовать всем указанным требованиям, как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения производительности. Программа НИОКР предусматривает, в том числе модули для бридинга трития. Это позволит отработать данные технологии для применения в промышленном ТЯР и снизить риски, связанные с проектом тритиевого завода. Ведутся активные проектно-исследовательские работы по системам топливного цикла. Созданы прототипы элементов систем разделения и детритизации, проводится математическое моделирование и оптимизация систем.

Работа установок ASDEX, DIII-D, JET, Tore Supra и LHD с инжекцией пеллет позволяет судить о высоком уровне готовности технологий, а также высокой эффективности данного метода инжекции топлива в плазму. Производство пеллет и ускорение до требуемых в проекте ИТЭР скоростей были успешно продемонстрированы.

Развитие системы инжекции нейтральных пучков в качестве метода дополнительного нагрева плазмы и генерации тока в ней интенсивно развиваются на многих установках. В рамках создания NBI для ИТЭР созданы полномасштабны стенды с революционными решениями, обеспечивающими проектные показатели мощности инжектируемого пучка. Успехи в проводимых работах позволяют рассчитывать на необходимую готовность технологий к моменту старта экспериментальной кампании.

Конструкция систем криогенной откачки ИТЭР хорошо проработана. Высоковакумные крионасосы будут обладать рекордными параметрами и должны обеспечить работу в режиме с коротким циклом регенерации. Локализация нарушения вакуума на ИТЭР является сложной задачей и может серьезно ограничить операции

на установке. Поэтому реализуется программа исследований и разработок, направленная на решение этой проблемы и разработку новых решений. Решения, принятые для форвакуумной откачки систем ИТЭР очень разнообразны в связи со спецификой систем и различными требованиями. Действующая программа развития направлена на решение технологических проблем и вопросов интеграции. Вспомогательные вакуумные компоненты и системы более традиционны и проработаны.

В целом схема топливного цикла соответствует требованиям ИТЭР, области с более высокими рисками были четко определены, и в них продолжаются исследования. Существует высокий уровень уверенности в том, что конструкция топливного цикла обеспечит решение всех поставленных задач ИТЭР в целом и, в частности, цели достижения $Q = 10$.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите газы, которые используются в топливном цикле.
2. Какие меры безопасности предпринимаются при обращении с топливом?
3. Назовите методы, которые применяются для ввода топлива в плазменный разряд.
4. Что такое принцип ALARA и что он подразумевает?
5. По какому принципу организован топливный цикл ИТЭР?
6. Какие системы топливного цикла можно отнести к обеспечивающим безопасность эксплуатации и почему?
7. Какое количество трития может быть использовано в разрядах ИТЭР за год?
8. Что такое «вспомогательные газы» и зачем они нужны в плазменных разрядах?
9. Что такое «трיתיевый цикл»? А «трיתיевый завод»?
10. Чем определяются высокая скорость пеллет и их размер?
11. Какие задачи решаются системой нейтральной инжекции и как она работает?

12. Чем определяется в длительном разряде баланс частиц в плазме?
13. Назовите факторы, влияющие на производительность системы разделения изотопов водорода.
14. Что определяет режим работы систем (отдельных) топливного цикла?
15. Чем определяется содержание трития в системах топливного цикла?

Список рекомендуемой литературы

1. The pre-concept design of the DEMO tritium, matter injection and vacuum systems / Chr. Day et al. // Fusion Engineering and Design. – 2022. – № 179. – P. 113–139.
2. Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self-sufficiency / M. Abdou et al. // Nucl. Fusion. – 2021. – № 61. – P. 013–001.
3. Analysis of promising technologies of DEMO-FNS fuel cycle / S. Ananyev et al. // Fusion Engineering and Design. – 2020. – № 161. – P. 111–940.
4. Кошлань, В.И. Аналитическое моделирование топливного цикла термоядерных и гибридных реакторов / В.И. Кошлань, С.С. Ананьев // Вестник МЭИ. – 2022. – №1. – С. 19–38.
5. Иванов, Б.В. Оценка уровня готовности технологий тритиевого цикла в России на примере проекта гибридного реактора ДЕМО-ТИН, ВАНТ / Б.В. Иванов, С.С. Ананьев // Сер. Термоядерный синтез. – 2021. – Т. 44, вып. 4. – С. 5–24.
6. Иванов, Б.В. Оценка уровня готовности технологий тритиевого цикла в России на примере проекта гибридного реактора ДЕМО-ТИН. Часть 2, ВАНТ / Б.В. Иванов, С.С. Ананьев // Сер. Термоядерный синтез. – 2022. – Т. 45, вып. 4. – С. 120–135.
7. Иванов, Б.В. Оценка уровня готовности технологий тритиевого топливного цикла для реактора ДЕМО-ТИН. Часть 3, ВАНТ / Б.В. Иванов, С.С. Ананьев, Н.П. Бобырь // Сер. Термоядерный синтез. – 2023. – Т. 46, вып. 1. – С. 49–63.

Глава 11. КРИОГЕННЫЙ КОМПЛЕКС

11.1. Общее описание системы

Одним из ключевых требований, предъявляемых к криогенной системе, является обеспечение устойчивой работы в условиях пульсирующего характера тепловой нагрузки, являющегося следствием колебаний индукции магнитного поля, производства нейтронов и др. Нестационарные процессы в плазме приводят к изменениям тепловых нагрузок и, следовательно, система криогенного гелиевого обеспечения должна справляться с колебаниями общей тепловой нагрузки, изменяя расход жидкой фракции теплоносителя (гелия) в рефрижераторе. Сглаживание пульсаций тепловой нагрузки, поддержка устойчивого функционирования в широкой области режимных параметров плазмы, снижение затрат за счет использования стандартных комплектующих являются основными задачами при разработке криогенной системы ИТЭР.

Криогенная система ИТЭР включает в себя три части: станцию для производства жидкого гелия, систему криораспределения и криолиний, подсистему жидкого азота.

Блок-схема криогенного обеспечения ИТЭР показана на рис. 11.1.

Оборудование криогенной системы следующее:

- криогенная станция, состоящая из четырех одинаковых криогенных блока-ожижителя гелия (КГУ 0-Р);
 - компрессорная станция для газообразного гелия;
 - система внешней очистки газообразного гелия;
 - емкости 5 для хранения теплого при температуре 300 К и давлении 1,8 МПа и охлажденного до 80 К гелия;
 - два одинаковых «холодных» блока 2 для гелия, связанных с двумя дополнительными холодными блоками 3 с жидким азотом, использующимися для охлаждения гелия от 100 до 80 К;
 - компрессорная станция в контуре газообразного гелия с температурой 80 К (на схеме не показана);
 - подсистема жидкого азота с двумя идентичными блоками для ожижения и хранения жидкого азота;

- компрессорная станция для газообразного азота (на рис 11.1 не показана).

Оборудование криогенных гелиевых установок размещается в двух зданиях.

Три «теплых» емкости 5 (на рис. 11.1 показан только один) для газообразного гелия при давлении 0,11 МПа (газгольдеры), один «холодный» резервуар при 80 К и баллоны для гелия с низким давлением, а также танк для жидкого азота 4 размещаются с внешней стороны здания криогенной станции. Емкости для теплого гелия используются для сбора его из криогенных элементов реактора во время их отогрева. Емкость 5 для холодного гелия с давлением 1,8 МПа применяется для сбора его из катушек тороидального поля в период разряда.

Тепловые нагрузки различных элементов реактора ИТЭР и расходы жидкого гелия:

расход жидкого гелия для охлаждения сверхпроводников, кг/с.....	0,1
статическая тепловая нагрузка магнитной системы, кВт.....	11,5
средняя пульсирующая тепловая нагрузка магнитной системы, кВт.....	13,1

Тепловая нагрузка, кВт:

циркуляционных насосах гелиевого контура.....	12,3
холодных компрессорах ¹	6,2
крионасосов тора, инжекторов.....	4

Расход жидкого гелия на охлаждение в период регенерации, кг/с.....	0,06
тепловая нагрузка других потребителей криогена ² , кВт.....	0,9
общая тепловая нагрузка, кВт.....	48
общий расход He [*] , кг/с.....	0,16

Суммарная тепловая нагрузка конструкций с жидким гелием равна 48 кВт, для чего в рефрижераторе требуется вырабатывать 0,16 кг/с жидкого гелия при следующем цикле работы в разрядной камере (при обеспечении 100%-ной надежности):

$\tau_{п} = 1800$ с – продолжительность паузы; $\tau_{р} 400$ с – продолжительность разряда.

¹ Компрессоры холодного гелия работают при 4,3 К и используются для охлаждения магнитной системы.

² Системы инъекции быстрых нейтральных атомов, пеллет–инъекции топлива и гиротронов.

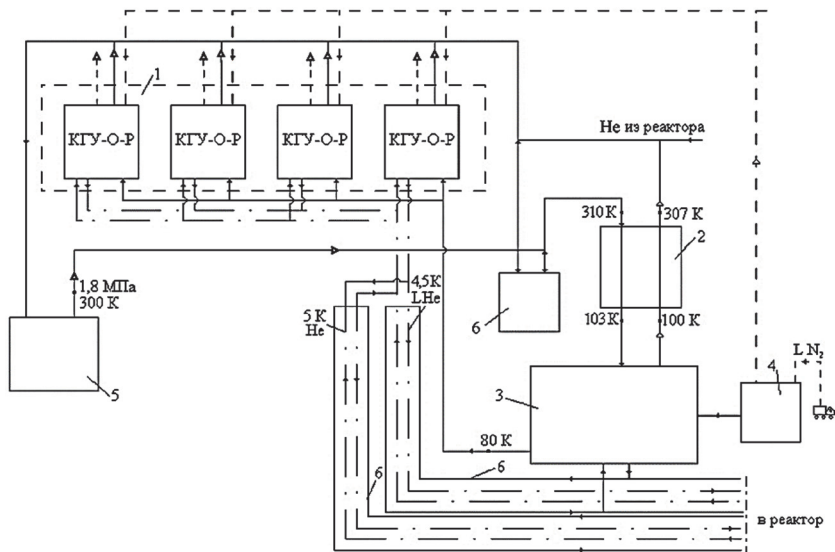


Рис. 11.1. Блок-схема криообеспечения ИТЭР:

- 1 – гелиевые криогенные установки КГУ-О-Р (4 шт.);
- 2 – холодные гелиевые блоки (2 шт.);
- 3 – вспомогательный блок для охлаждения гелия до 80 К, (2 шт.);
- 4 – емкость для хранения жидкого азота; 5 – хранилище газообразного гелия,
- 6 – две идентичные криолинии между криогенной станцией и реактором,
- 7 – станция очистки и компримирования He^g (на схеме не указана);
- $\text{N}_2^{\text{ж}}$, $\text{He}^{\text{ж}}$ – жидкий азот и гелий; He^g – газообразный гелий

Основным потребителем криогенных жидкостей является магнитная система, которая включает в себя 18 катушек тороидального поля, 6 катушек полоидального поля в совокупности с катушками коррекции и магнитных механических структур, а также криостат. Жидкий гелий с расходом 0,1 кг/с требуется для охлаждения основных токовых катушек.

Общая тепловая нагрузка магнитной системы складывается из тепловых притоков от системы тепловой защиты, находящейся при температуре 80 К, и по тепловым мостам опорных узлов за счет теплопроводности, а также из осредненных, теплопритоков за счет электромагнитных потерь и ядерного нагрева. Последние составляют внутреннюю, пульсирующую тепловую нагрузку. Криогенные системы ИТЭР сконструированы так, чтобы была обеспечена устойчивая работа криогенного оборудования.

Крупным потребителем криопродуктов является система вакуумной откачки токамака, которая включает в себя 24 криовакуумных насосов первичной вакуумной системы, четыре криовакуумных насоса инжектора пучка быстрых нейтральных частиц и два криовакуумных насоса криостата.

Криогенный гелиевый комплекс состоит из четырех одинаковых криогенных гелиевых установок, каждая из которых имеет холодопроизводительностью 18 кВт. Подобная КГУ эксплуатировалась в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН), таким образом, можно считать, что технологическая база для их изготовления имеется.

Гелиевый контур при $T = 80$ К и подсистема жидкого азота. Поток сжатого гелия при $T = 80$ К используется для активного охлаждения элементов тепловой защиты (тепловых экранов). В номинальном режиме работы температура гелия на входе в теплозащитный экран равна 80 К, а на выходе из него — 100 К. Жидкий азот используется для предварительного охлаждения гелия до 80 К, поступающего в теплозащитные экраны.

Подсистема жидкого азота вместе с гелиевым контуром при $T = 80$ К предназначены для охлаждения следующих конструкций ИТЭР:

- вакуумной камеры и элементов тепловой защиты, находящихся внутри криостата;
- узлов крепления магнитной системы и вакуумной камеры;
- шевронных экранов и системы тепловой защиты криовакуумных насосов;
- элементов тепловой защиты всех линий передачи криоагента и криотрубопроводов;
- системы предварительного охлаждения гелия до 80 К, как это требуется в криогенном цикле гелиевых рефрижераторов;
- внешней системы очистки гелия.

Схема контура охлаждения гелия до 80 К вместе с подсистемой жидкого азота и гелиевыми рефрижераторами показана на рис. 11.1. Гелиевый контур охлаждения до 80 К включает в себя два одинаковых холодных гелиевых блока и два вспомогательных блока

с жидким азотом для предварительного охлаждения гелия до 80 К (поз. 2 и 3 на рис. 11.1 соответственно). Если один гелиевый блок или вспомогательный азотный блок находится на обслуживании, другой будет охлаждать элементы тепловой защиты с более высокой температурой на выходе (120 К). Такая конструкция обеспечивает очень высокий уровень надежности магнитной системы при низкой температуре, несмотря на возможные сбои в функциональной работе криооборудования.

В каждом блоке гелиевого контура при 80 К из рефрижератора в теплообменник подается обратный поток гелия для охлаждения поступающего гелия от 310 до примерно 103 К, при этом обратный поток азота нагревается от 100 до 307 К. Разность температур между прямым и обратным потоками в теплообменнике равна 3 К (температурный напор). Окончательное охлаждение потока гелия от 103 до 80 К имеет место во вспомогательном блоке теплообменника с жидким азотом.

Тепловая нагрузка, кВт, азотного контура при 80 К в номинальном режиме работы и в режиме откачки вакуумных объектов приведена в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Тепловая нагрузка подсистемы жидкого азота

Потребитель	Нормальный режим	Режим откачки вакуумных объемов
Элементы тепловой защиты и узлы крепления криогенного оборудования токамака	385	740
Элементы тепловой защиты: всех криогенных линий криогенных насосов	50 40	50 20
Подсистема жидкого азота для гелиевых рефрижераторов	280	70
Общая тепловая нагрузка всех элементов	755	880
Общая холодопроизводительность азотного рефрижератора	830	950

Подсистема азотного рефрижератора действует по закрытому (замкнутому) циклу. Два азотных рефрижератора (ожижителя) холодопроизводительностью 450 кВт каждый, включены в криогенный комплекс токамака. Конструкция азотного рефрижератора является общепринятой, аналогичной используемой в воздухоразделительных установках. Азотная подсистема включает в себя также два танка для жидкого азота емкостью по 50 м³ с целью обеспечения большей устойчивости криогенного комплекса к скачкам тепловых нагрузок.

Система криораспределения. Система криораспределения обеспечивает охлаждение вынужденным потоком закритического гелия магнитной системы и криогенных вакуумных насосов с помощью холодных циркуляционных насосов. Последние насосы способны обеспечить циркуляцию больших потоков гелия через криогенные конструкции ИТЭР, значительно превышающих потоки, которые производят криогенные рефрижераторы. Холодные циркуляционные насосы размещены в пяти отдельных вспомогательных холодных блоках (АСВ_s). Система криораспределения включает в себя также 12 одинаковых концевых криогенных блока (СТСВ_s), которые необходимы для конечного охлаждения до 4,6 К потока закритического гелия основных токовых катушек.

Холодные компрессоры входят в систему криораспределения. Они обеспечивают прокачку закритического гелия через пластинчатые теплообменники, размещенные в ванне кипящего гелия всех вспомогательных холодных блоков магнитной системы, и размещаются в блоках холодных компрессоров (ССВ). Закритический гелий на выходе из холодных блоков имеет температуру 4,3 К.

Все холодные блоки системы криораспределения установлены внутри основного здания токамака. Каждый холодный блок соединен протяженными криолиниями и кольцевым криогенным трубопроводом с несколькими холодными концевыми устройствами (СТВ) или блоком холодных вентилях (СВВ_s) каждого индивидуального потребителя. Эти холодные концевые блоки и блоки холодных клапанов принадлежат системе индивидуальных пользователей.

Конструкция типовых холодных блоков магнитной системы описана ниже. Каждый холодный блок включает в себя два циркуляционных насоса (компрессора). При использовании двух насосов обеспечивается избыток расхода криогена, в то время как одного насоса недостаточно. Каждый насос оборудован электродвигателями с переменной частотой вращения и работает с подачей, равной 50% номинальной. Номинальный расход гелия может быть достигнут, когда один из двух насосов будет остановлен.

Расход гелия и перепад давления, необходимые для работы гелиевых циркуляционных насосов и холодных компрессоров, а также тепловая нагрузка теплообменников каждого холодного блока приведены в табл. 11.2

Таблица 11.2

Параметры холодных компрессоров и насосов

Оборудование	Расход гелия, кг/с	Перепад давления, МПа	Потребляемая мощность, кВт	Тепловая нагрузка теплообменников в холодных блоках, кВт
Насосы кожуха и структур тороидального поля	4,5	0,04	1,9	17,42
Насосы катушек тороидального поля	3	0,12	6,0	6,35
Насосы катушек коррекции полоидального поля	2	0,1	2,2	4,26
Насосы центрального соленоида	2	0,1	2,2	5,05
Насосы системы вакуумной откачки тора	2,4	0,05	1,3	4,0
Холодные компрессоры	2,2	0,0158	6,2	—

Основные параметры циркуляционного контура

1. Кожух катушек тороидального поля включен в отдельную систему охлаждения гелием. Тепловая нагрузка на кожух – максимальная, достигает $Q_{\text{кож}} = 17,42$ Дж, расход жидкого гелия тоже максимальный и равен $4,5$ кг/с.

2. Поперечное сечение каналов циркуляции гелия в кожухе выше, чем в катушках СОТП ($d_{\text{кож}} = 2d_{\text{кат}}$), этим и объясняется заметно меньший перепад давления теплоносителя в кожухе.

3. Внешние условия катушек и кожуха полоидального поля, а также центрального солонида примерно одинаковые, поэтому в табл.11.2 объединены.

4. Как следует из табл.11.2 расход жидкого гелия на станции криовакuumной откачки составляет $2,4$ кг/с (меньше чем расход на катушки тороидального поля, но превышает соответствующий расход на катушки полоидального поля).

5. Холодные компрессоры помещены в ванну с жидким гелием вспомогательных холодных блоков катушек тороидального поля АСВ_s. Тепловая нагрузка холодных компрессоров не оценивается, ввиду ее малости. Однако потребляемая энергия, естественно, самая высокая.

Два типа высокорасходных насосов с регулируемой частотой вращения электродвигателей были разработаны со следующими параметрами: $G = 1,5$ кг/с, $p = 0,12$ МПа и $G = 2,5$ кг/с, $p = 0,05$ МПа соответственно. Эффективность использования насосов принимается равной $0,8$. Насосы устанавливаются в соответствии со схемой, приведенной на рис. 11.2.

Холодные компрессоры сконструированы для работы в условиях магнитного поля. Эти компрессоры снижают пары гелия при $T = 4,3$ К и давлении насыщения $p_s = 0,1089$ МПа до давления $p_s = 0,1247$ МПа при соответствующей температуре $T_s = 4,5$ К.

Система криогенных линий и трубопроводов. Система криогенных линий и трубопроводов, размещенная внутри корпуса токамака, включает в себя следующие элементы:

– трубопроводы, соединяющие изолированные вспомогательные блоки с блоками холодных компрессоров и двумя концевыми криогенными устройствами холодных блоков;

– две криолинии и два полукольцевых трубопровода, снабжающих гелием девять холодных концевых блоков катушек тороидального поля;

– криолинию и два трубопровода для снабжения гелием 11 холодных концевых блоков катушек полоидального поля и коррекции;

– две криолинии для снабжения трех блоков холодных клапанов магнитных структур;

– две криолинии от концевых криогенных устройств блоков холодных клапанов, снабжающих два блока холодных клапанов системы тепловой защиты при 80 К;

– криолинию и два трубопровода для обеспечения шести блоков холодных клапанов криостата;

– криолинию и трубопровод, снабжающие четыре блока холодных клапанов крионасосов системы откачки инжекторов нейтральных пучков;

– криолинию для снабжения одного блока холодных клапанов крионасосов криостата;

– четыре криолинии и четыре трубопровода для снабжения 20 блоков холодных клапанов крионасосов тора;

– четыре коротких криолинии для связи изолированных вспомогательных холодных блока магнитной структуры с двумя концевыми криогенными устройствами холодных блоков и двумя танками с жидким гелием.

Криолинии и кольцевые трубопроводы, соединяющие изолированные вспомогательные холодные блоки с концевыми криогенными устройствами холодных блоков и блоками холодных клапанов каждого индивидуального потребителя криопродукта, размещены вокруг криостата токамака на трех различных уровнях корпуса токамака, в частности выше уровня концевых криогенных устройств (базовый уровень – ниже уровня концевых криогенных устройств). Общие виды криолиний и трубопроводов изображены на рис. 11.2. и 11.3.

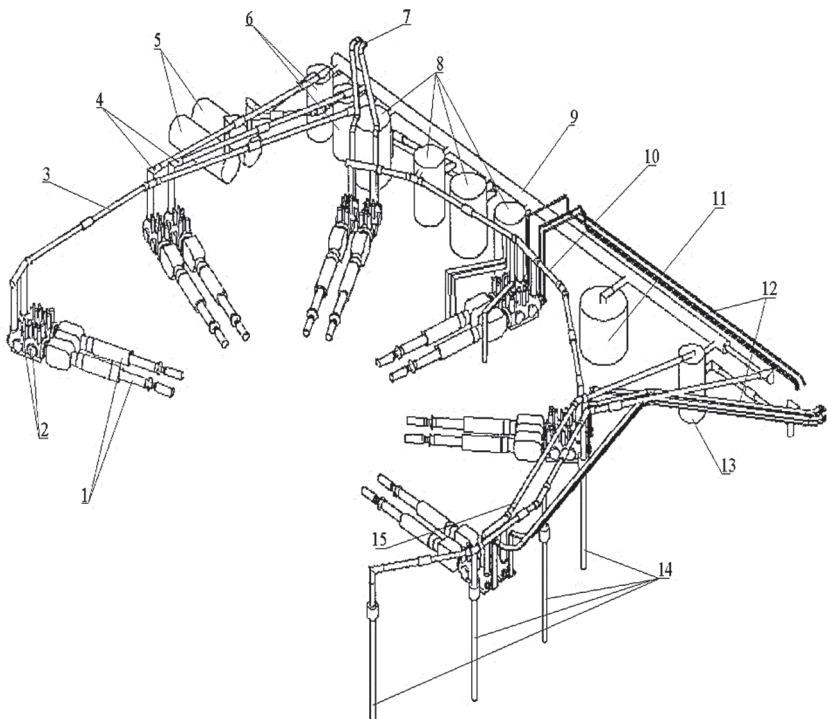


Рис. 11.2. Расположение блоков криораспределения и криолиний на уровне холодных конечных устройств:

- 1 – фидеры холодных конечных устройств;
- 2 – холодные конечные устройства СТЦВs; 3 – криолиния для потребителей;
- 4 – криолинии систем тепловой защиты;
- 5 – емкости для жидкого гелия;
- 6 – конечной криогенный блок;
- 7,12 – система шин;
- 8 – вспомогательные холодные блоки АСВs;
- 9 – криолиния вспомогательных холодных блоков;
- 10 – криолиния катушек полоидального поля;
- 11 – блок холодных клапанов;
- 13 – холодный блок;
- 14 – криолинии для крионасосов инжекторов быстрых нейтральных атомов;
- 15 – криолиния криостата реактора

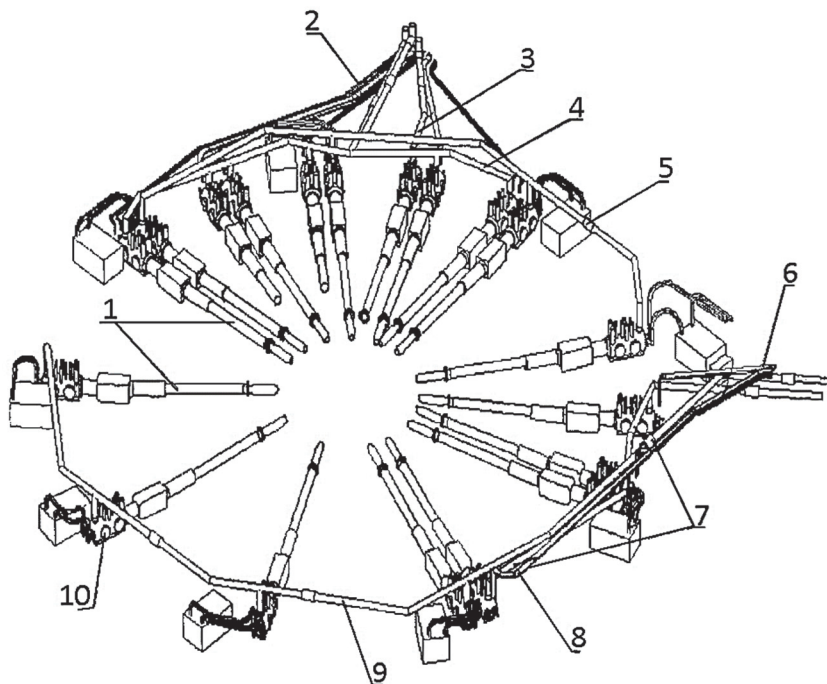


Рис. 11.3. Схема криолиний ниже уровня конечных криогенных блоков:

- 1 – фидеры холодных конечных устройств;
- 2, 6, 8 – система шин;
- 3 – криолиния для потребителей;
- 4 – криолиния для катушек полоидального поля;
- 5, 9 – криолинии для катушек тороидального поля;
- 7 – криолиния криостата;
- 10 – холодные конечные устройства

С целью минимизировать расходы криогенных жидкостей и габариты всех криолиний и трубопроводов в ограниченной области вокруг токамака, в проекте использованы следующие принципы:

- конструкция криолиний и трубопроводов упрощена, нет холодных клапанов или датчиков температуры и давления, установленных на криолиниях или трубопроводах (все клапаны, датчики размещены в соответствующих блоках);

– трубопроводы расположены на минимальном расстоянии друг от друга, равном 50 мм, в целях использования сварки (резки) при монтаже или ремонте;

– только сварные соединения элементов применяются при создании секций криолиний и трубопроводов;

– минимальное число вакуумных оболочек (защит) предусматривается в трубопроводах. Вакуумная защита применяется только между трубопроводами и изолированными вспомогательными холодными блоками.

Типовая конструкция трубопровода для магнитной системы была сконструирована на основе двух полукольцевых трубопроводов катушек тороидального поля. Эти два трубопровода заканчиваются двумя криолиниями, ведущими к изолированным вспомогательным холодным блокам. Трубопроводы тороидального поля или трубопроводы других катушек содержат несколько секций прямых труб длиной 10÷15 м и несколько секций коротких изогнутых труб (1,5÷2,2 м), которые соединяются с кольцевым трубопроводом.

Поперечное сечение трубопровода тороидального поля приведено на рис. 11.4. Этот трубопровод включает в себя пять холодных труб. Одна из двух труб, предназначенная для гелия с температурой 80 К, присоединена к алюминиевой оболочке в целях ее активного охлаждения.

Каждая секция прямых труб имеет сильфонную секцию для компенсации термических удлинений трубопроводов, одну фиксированную опору и несколько скользящих упоров для направления сильфонов.

Внутренняя конструкция секции изогнутых труб идентична конструкции секции прямых труб. Каждая секция изогнутых труб имеет одну фиксированную опору. Холодные трубы оборудованы сильфонной секцией в целях компенсации термических удлинений.

Некоторые элементы конструкции трубопровода тороидального поля использованы в криолиниях и трубопроводах других магнитных систем ИТЭР, а также в крионасосах тора и инжектора быстрых нейтральных атомов.

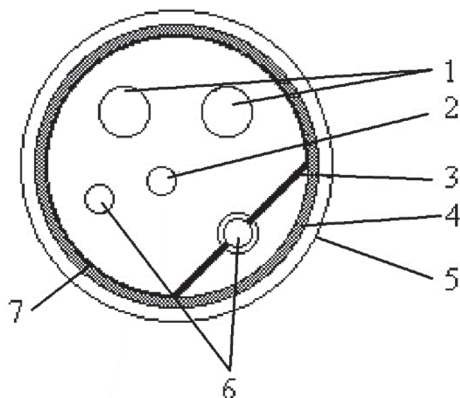


Рис. 11.4. Поперечное сечение кольцевого трубопровода:

- 1 – две трубы для подачи/возврата жидкого гелия при $T = 4,5$ К, $d = 80$ мм;
- 2 – труба для подачи основного потока гелия при $T = 4,5$ К, $d = 40$ мм;
- 3 – ребро, обеспечивающее тепловой контакт гелиевой трубы при $T = 80$ К с оболочкой тепловой защиты;
- 4 – многослойная суперизоляция;
- 5 – внешняя оболочка вакуумной теплоизоляции, $T = 300$ К, $d = 406$ мм;
- 6 – две трубы подачи/возврата гелия при $T = 80$ К, $d = 40$ мм;
- 7 – оболочка тепловой защиты при $T = 80$ К

Различие заключается в том, что подводящие (отводящие) трубопроводы крионасосов тора имеют внутри три холодные трубы, а трубопроводы инжектора и криостата – по шесть холодных труб.

В систему криолиний входят также две идентичные криолинии по 100 м длиной для соединения гелиевых установок криогенного комплекса с главным корпусом токамака, в котором установлены концевые криогенные устройства холодных блоков.

11.2. Описание конструкции отдельных систем

«Теплые» газовые компрессоры. Винтовые компрессоры являются основной конструкцией в рефрижераторе-ожижителе гелия. Один компрессор имеет три агрегата первой ступени сжатия от $p = 0,1$ до $p = 0,36$ МПа, два агрегата компрессора второй ступени

сжимают гелий до 1,9 МПа. Компрессор оборудован двумя сепараторами для очистки гелия от масла, используемого в компрессоре для смазки, и охлаждается водой. Малое количество оставшегося в гелии масла после сепаратора второй ступени отделяется тремя фильтрами и, наконец, абсорбируется активированным углем. Два гелиевых винтовых компрессора используются в холодном гелиевом контуре при температуре 80 К.

Два центробежных компрессора применяются в подсистеме жидкого азота. Компрессоры гелиевого ожижителя снабжены осушителями гелия в контуре при 80 К.

Криогенные гелиевые установки – ожижители-рефрижераторы (КГУ-0-Р). Конструкция ожижителя гелия основана на модифицированном модуле ожижителя ЦЕРНа холодопроизводительностью 18 кВт при рабочей температуре $T_0 = 4,5$ К. В схеме модуля (рис. 11.5.) предусмотрена ступень предварительного охлаждения жидким азотом (поз. 3 на рис. 11.5.) с циклом на трех уровнях давления He.

Схема ожижителя-рефрижератора включает в себя три гелиевых контура с давлениями 1,9, 0,36 и 0,11 МПа. В контур при давлении $p_1 = 0,36$ Мпа поступает гелий, охлажденный в детандерах D_1 и D_2 (отборы m_{D_1} и m_{D_2}). Ожижитель гелия состоит из первой ступени предварительного охлаждения жидким азотом, нескольких теплообменников, охлаждаемых обратным потоком гелия, и четырех холодных гелиевых турбин – детандеров, два из которых включены в прямой поток для дополнительного охлаждения гелия (процессы 7–8 и 9–10).

Гелиевый ожижитель L-образной формы (рис. 11.6) состоит из двух вакуумных цилиндров (вертикального и горизонтального).

Вертикальный цилиндр диаметром 4 м и высотой 9 м включает в себя все гелиевые теплообменники. Горизонтальный цилиндр диаметром 3,5 м и длиной 12 м содержит все холодные турбины, криогенные вентили и азотную ванну.

Гелиевый контур при $300 \div 80$ К включает в себя два вертикальных холодных блока высотой по 8 м и два вспомогательных блока с жидким азотом высотой 5 м. Все эти блоки имеют стандартную (общепринятую) конструкцию.

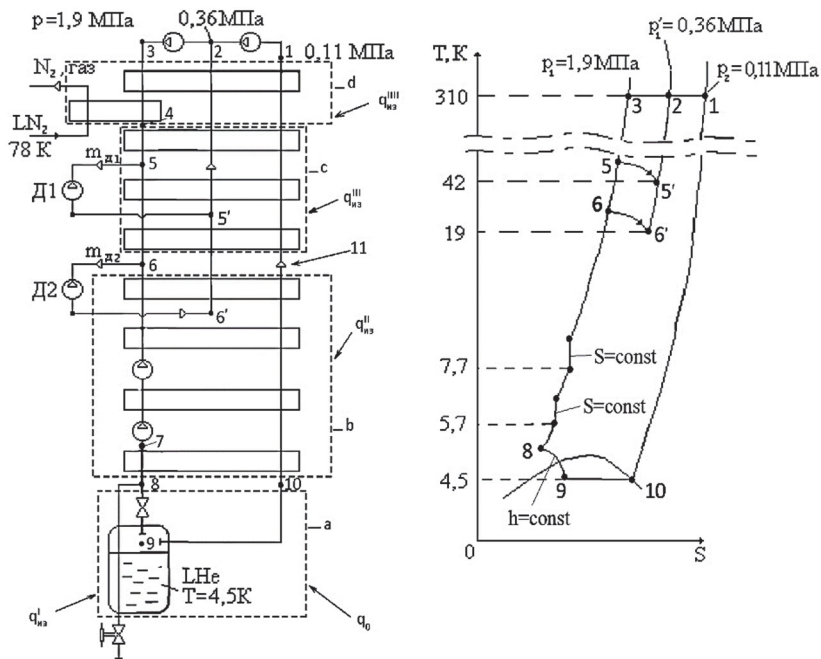


Рис. 11.5. Криогенная гелиевая установка КГУ-О-Р и T, S -диаграмма:

m_{D_1} и m_{D_2} – масса отбора в детандеры;

(·)1÷(·)11 – термодинамическое состояние теплоносителя;

$S = \text{const}$, $h = \text{const}$ – характеристика процессов, происходящих в этих устройствах

Вертикальный блок состоит из теплообменников ступени предварительного охлаждения рефрижератора, охлаждаемых обратным потоком гелия.

Вспомогательный блок включает в себя азотную ванну и гелиевый теплообменник, погруженный в эту ванну.

Подсистема жидкого азота оборудована двумя вертикальными холодными блоками высотой по 10 м и двумя детандерами. Эти блоки также имеют стандартную конструкцию, аналогичную конструкции воздухоразделительных установок.

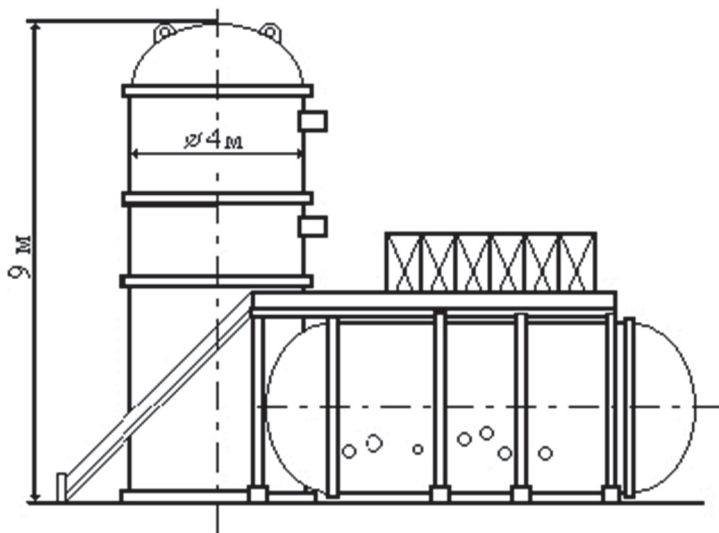


Рис. 11.6. Общий вид модуля КГУ-О-Р (прототип КГУ-О-Р ЦЕРНа)

Типовые вспомогательные холодные блоки магнитной системы. Все вспомогательные холодные блоки магнитной системы имеют одинаковую конструкцию. Вертикальное поперечное сечение вспомогательного холодного блока катушек тороидального поля показано на рис. 11.7. Этот блок включает в себя следующие элементы:

- вертикально-ориентированную цилиндрическую вакуумную оболочку 1 с выводами общего кольцевого трубопровода 5 и двух криолиний катушек тороидального поля 6;
- два циркуляционных гелиевых насоса 7 (на рисунке показан только один);
- ванну с жидким гелием 2;
- теплообменник для закритического гелия пластинчатого и оребренного типа 3, погруженный в гелиевую ванну 2;
- холодные клапаны 4;
- криогенные датчики и нагреватель как имитатор нагрузки.

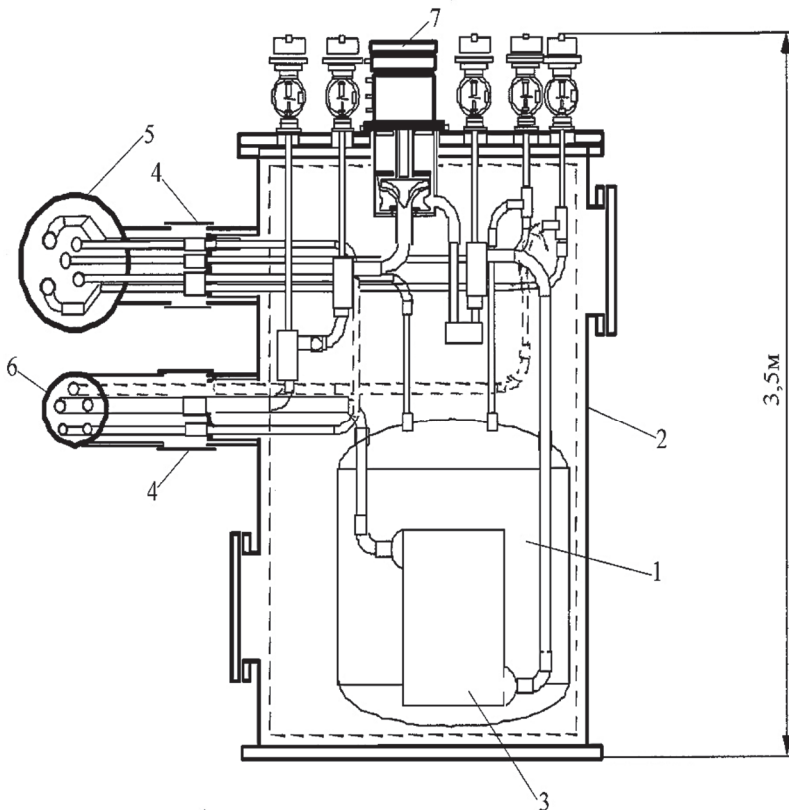


Рис. 11.7. Поперечное сечение вспомогательного холодного блока катушек тороидального магнитного поля (АСВ):

- 1 – ванна с жидким гелием;
- 2 – внешняя оболочка;
- 3 – панельный теплообменник;
- 4 – холодные клапаны;
- 5 – магистраль катушек тороидального поля;
- 6 – магистраль катушек полоидального поля;
- 7 – электродвигатель холодного компрессора

Контроль постоянной тепловой нагрузки гелиевого ожигателя. Испытания на ИТЭР начнутся с экспериментов с водородной, а затем дейтериевой плазмой при минимальной тепловой нагрузке и пониженном уровне пульсации в плазме. Затем будут

проведены эксперименты с тритием также при сниженном уровне тепловых нагрузок в течение разрядного импульса в плазме и при сниженных значениях силы тока в плазме или увеличенных интервалах времени (паузах) между разрядами.

Гелиевый ожижитель сконструирован так, чтобы обеспечить необходимую потребность в несколько уменьшенной холодопроизводительности по сравнению с номинальной, в течение первых нескольких лет. Рабочие характеристики ожижителя по производству жидкого гелия соответствуют изменениям рабочих параметров пульсирующей плазмы, включая следующее: один период продолжительностью несколько часов при параметрах плазмы, соответствующих максимальной тепловой нагрузке, и следующий период в несколько часов при сниженных пульсациях параметров плазмы. При уменьшенных пульсациях плазмы часть жидкого гелия, произведенного ожижителем, накапливается в танке для хранения жидкого гелия в целях последующего его использования в режимах с максимальной тепловой нагрузкой. Эти рабочие режимы циклически повторяются.

Предусмотрена следующая упрощенная процедура подготовки системы криогенного обеспечения токамака к рабочим режимам разряда в плазме:

- проводится проверка уровня жидкого гелия в ванне каждого вспомогательного холодного блока. Если объем гелия больше 20 м^3 , возможны режимы с максимальной тепловой нагрузкой. Если же объем жидкого гелия меньше 20 м^3 , то в течение $4\div 10$ ч допускаются режимы в плазме при уменьшенной тепловой нагрузке до тех пор, пока объем жидкого гелия в танке не превысит 20 м^3 ;

- согласно разработанным сценариям исследований в плазме, тепловая нагрузка в серии разрядных импульсов фиксируется, при скорости вращения валов холодных циркуляционных насосов и холодных компрессоров (следовательно, и расход гелия) регулируется, оставаясь постоянными в последующих разрядах в плазме;

- уменьшение холодопроизводительности ожижителя достигается снижением рабочего давления прямого потока от $1,9$ до $1,3$ МПа.

Одним из наиболее трудновыполнимых требований для гелиевого ожижителя является теплосъем высоких пульсирующих тепловых нагрузок, возникающих в сверхпроводящих катушках магнитной системы, поскольку обычные ожижители обеспечивают устойчивый режим только при небольших колебаниях тепловой нагрузки.

Для сглаживания пульсаций тепловой нагрузки разработана специальная процедура охлаждения. Каждый вспомогательный, холодный блок оборудован байпасным клапаном, который пропускает часть потока гелия, нагретого в магнитной системе, и возвращает его в катушки, минуя теплообменник в ванне с жидким гелием.

Эта процедура контроля основана на периодическом открытии и закрытии байпасного клапана в целях регулирования температуры критического гелия в теплообменнике вспомогательного холодного блока.

Во вспомогательный, холодный блок входят следующие дополнительные клапаны и регуляторы (рис. 11.7):

- контрольный клапан для обеспечения постоянного уровня жидкого гелия в ванне каждого вспомогательного холодного блока при текущей тепловой нагрузке;
- регулятор скорости вращения валов (подачи) холодных компрессоров и циркуляционных насосов для жидкого гелия в соответствии с ожидаемой тепловой нагрузкой;
- контрольный клапан для регулировки массового расхода;
- регулятор электрического нагревателя, для обеспечения постоянной тепловой нагрузки в ванне с жидким гелием, в случаях снижения ее за счет потока критического гелия из магнитной системы.
- холодный клапан для поддержания постоянного давления паров гелия на входе в холодный компрессор. Благодаря работе этого клапана постоянный поток гелия возвращается в холодный компрессор даже в случае, когда тепловая нагрузка в ванне с жидким гелием поднимается выше значения, на которое настроен холодный компрессор.

При проектировании системы криогенного обеспечения ИТЭР было выполнено компьютерное моделирование процесса охлаждения катушек полоидального и тороидального магнитных полей, криостата вместе с корпусом катушек, с обеспечением контроля активного охлаждения и использованием байпасных клапанов. Для моделирования охлаждения использовался код *VINCENTA* версия 4.2. Этот код позволяет исследовать переходные процессы при решении тепловой и гидродинамической задач, получать профили температур, термическое сопротивление между различными слоями катушек и магнитных структур. Он моделирует (в пространстве и во времени) неоднородное распределение тепловых нагрузок, возникающих вследствие вихревых токов и ядерного нагрева в катушках и магнитных структурах. В этот код были включены модели криолиний, гелиевых вводов, теплообменников вспомогательных холодных блоков, байпасных клапанов, предназначенных для активного сглаживания пульсаций тепловой нагрузки, а также гелиевых циркуляционных насосов.

Контроль активного охлаждения осуществляется повторными открытием и закрытием байпасного клапана при циклически повторяющемся росте температуры гелия на входе в проводник или увеличении тепловой нагрузки в проводниках катушек тороидального магнитного поля. Необходимость использования кода *VINCENTA* для анализа контроля активного охлаждения объясняется тем, что код позволяет точно выбирать возможный рост температуры проводника и гарантировать, что она не выйдет за установленные пределы.

Результаты численных теплового и гидравлического моделирования контроля за охлаждением показали, что температура проводников катушек тороидального, полоидального магнитных полей и криостата не достигает максимального значения. Однако рабочая температура холодного гелиевого компрессора должна жестко поддерживаться на уровне 4,3 К.

Так, например, на рис. 11.8 показаны результаты моделирования тепловых процессов для самого крупного элемента магнитной системы – катушки тороидального магнитного поля с кожухом.

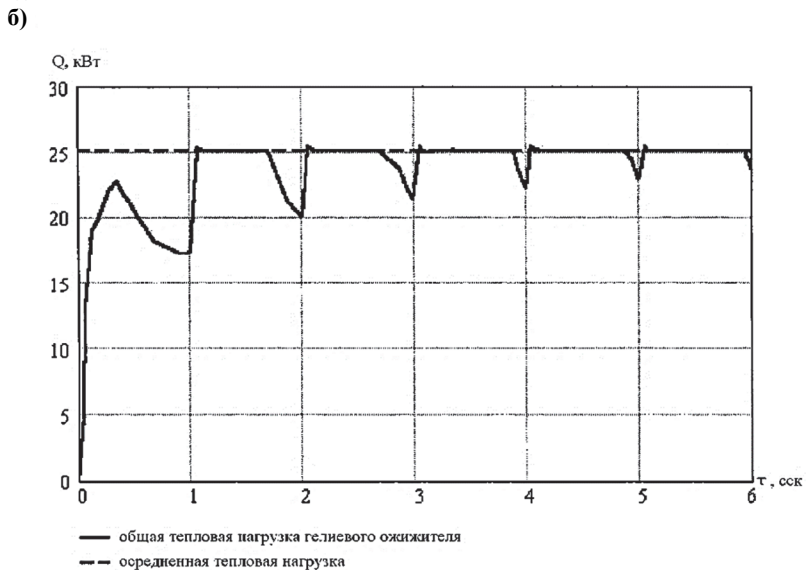
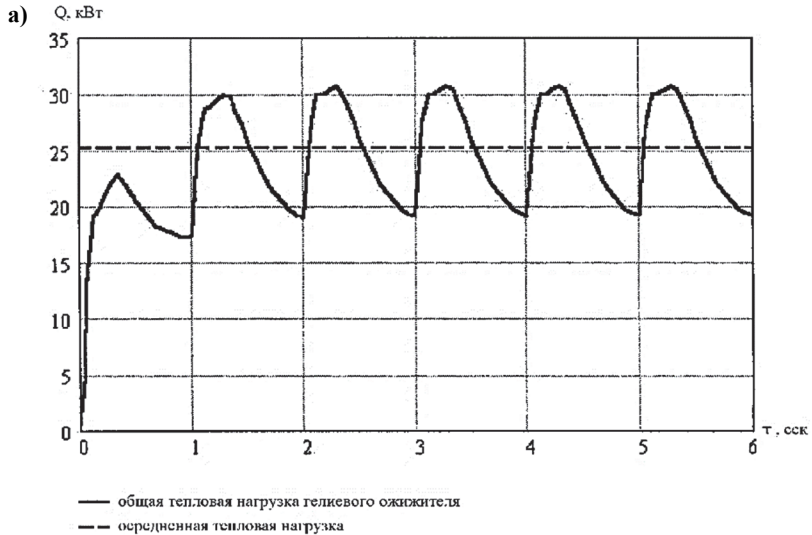


Рис. 11.8. Эволюция общей тепловой нагрузки катушек тороидального магнитного поля:

а – без активного контроля и регулирования охлаждения;

б – с использованием системы активного контроля и регулирования охлаждения

Были сравнены два различных процесса охлаждения: а) без сглаживания пульсаций тепловой нагрузки; б) с использованием системы активного контроля за охлаждением. Как видно из рис. 11.8а, тепловая нагрузка гелиевого ожижителя изменяется в течение каждого импульса в плазме от 20 до 30 кВт, если система активного контроля не используется. Использование системы активного контроля и регулирования рис. 11.8б приводит к тому, что практически постоянная нагрузка (25 кВт) устанавливается в гелиевом ожижителе уже после третьего импульса.

11.3. Процедура охлаждения ИТЭР от 300 до 4,5 К

Сценарий охлаждения ИТЭР главным образом определяется охлаждением магнитной системы. Процесс охлаждения подразделяется на две стадии: 1) от 300 до 80 К; 2) от 80 до 4,5 К.

В течение первой стадии температура гелия на входе постепенно снижается со скоростью $0,4 \div 0,5$ К/ч. Скорость охлаждения определяется допустимым значением механических напряжений. Постепенное охлаждение обеспечивается потоком сжатого гелия из ожижителя. Анализ переходных процессов охлаждения магнитной системы показал, что наибольшее гидравлическое сопротивление из всех конструкций ИТЭР имеют катушки тороидального магнитного поля. Градиент температуры вдоль проводника катушек достигает 40 К в процессе охлаждения со скоростью 0,5 К/ч. Катушки полоидального поля, криостат, другие элементы магнитной системы и элементы тепловой защиты при 80 К охлаждаются по той же схеме, что и катушки тороидального поля, так как все элементы магнитной системы должны быть одновременно охлаждены, чтобы обеспечивалось тепловое равновесие. Схема постепенного охлаждения основана на регулировании температуры потока гелия посредством соответствующего долевого смешивания теплого и с температурой 80 К потоков гелия.

В этом цикле охлаждения гелий, проходя через катушки, возвращается в теплообменник ожижителя, а холодный азот – в подсистему жидкого азота. При этом подсистема жидкого азота рабо-

тает в наиболее эффективном рефрижераторном режиме. Холодопроизводительность подсистемы жидкого азота может быть существенно увеличена в режимах с пиковой тепловой нагрузкой. Общая холодопроизводительность подсистемы жидкого азота для охлаждения магнитной системы вместе с элементами тепловой защиты и узлами крепления равна 900 кВт (см. выше). Как ожидается, продолжительность первой стадии охлаждения ИТЭР не превысит 20 дней.

Закритический гелий используется для охлаждения ИТЭР на второй стадии – от 80 до 4,5 К. Постепенное снижение температуры циркулирующего гелия обеспечивается уменьшением доли газообразного гелия, имеющего температуру 80 К (поток гелия, охлажденного в азотном теплообменнике). Холодный клапан, входящий в блок холодных клапанов ожижителя, регулирует расход обратного потока гелия через теплообменник ожижителя, обеспечивая тем самым необходимый уровень температуры. На этой стадии охлаждения потребление жидкого азота такое же, как и в оптимальном режиме работы модуля с жидким азотом при температуре 4 К.

Ожидается, что продолжительность второй стадии охлаждения не превысит 7 дней.

Процедура возвращения (отогрева) охлажденного ИТЭР в теплое состояние обратна процедуре охлаждения. Скорость нагрева от 80 до 310 К не должна превышать 0,5 К/ч.

11.4. Перекачка гелия в холодный резервный танк в период разряда

Примерно 5 МДж энергии будет выделяться внутри радиальных пластин и в кожухах 18 катушек тороидального магнитного поля в период разряда. Выделение этой энергии имеет нестационарный характер, результатом чего является рост температуры радиальных пластин катушек тороидального поля от 4,5 до примерно 50 К в течение 15 с. Вследствие этого роста температуры из 18 катушек тороидального поля и их кожухов выталкивается 40 и 12 м³ гелия соответственно.

С целью избежать потери гелия в атмосферу, в состав гелиевой системы ИТЭР включен танк для хранения газообразного гелия вместимостью 700 м³. Этот танк охлаждается до 80 К, устанавливается на расстоянии 60 м от корпуса токамака и связан с магнитной системой через систему трубопроводов.

Код VINCENTA (версия 4.2) был использован и для анализа процесса перекачки гелия в холодный резервный танк. В основу анализа была положена энергия разряда, имеющая место в конце фазы четвертого импульса в плазме. Регулирующие клапаны холодных концевых устройств и блока холодных клапанов открываются, когда давление гелия достигает 1,6 МПа.

Главной целью этого переходного анализа по перекачке гелия из танка в рефрижератор является определение необходимого диаметра протяженной гелиевой подающей линии. Диаметр этой линии выбирается из условия ограничения давления гелия (~2,5 МПа) в криогенном трубопроводе и гелиевом циркуляционном насосе.

Приведем основные результаты анализа:

- подающая (подводящая) линия должна обеспечить максимальный расход гелия, равный 140 кг/с, в первые 15 с после начала первого разрядного импульса. Затем расход экспоненциально должен уменьшаться до нуля в течение последующих 130 с;

- длина подающей (подводящей) линии равна 60 м, диаметр – 300 мм;

- диаметр двух параллельных в форме полукольца 100-метровой длины трубопроводов, которые соединяют концевые криогенные устройства вспомогательных холодных блоков катушек тороидального поля с общей подающей (подводящей) линией составляют 100 мм;

- трубопровод кожуха катушки тороидального поля, соединяющий блок холодных клапанов кожуха катушек с подводящей линией имеет диаметр 150 мм и длину 40 м;

- максимальное давление гелия внутри 18 обмоток катушек тороидального поля равно 12 МПа. Однако максимальное давление на входе в регулирующие клапаны катушки тороидального поля и ее кожуха составляют 2,5 и 2,0 Мпа соответственно;

– охлаждение катушек тороидального поля в первые 12 с после начала разрядного импульса осуществляется благодаря активному термическому контакту между «горячей» радиальной пластиной и «холодным» проводником катушек. Однако доля дополнительной энергии не превышает 10% общих тепловыделений (общей отводимой энергии) и составляет 5 МДж. Эта дополнительная энергия практически не влияет на повышение давления в подающей линии.

11.5. Охлаждение катушек тороидального поля после быстрого разряда

В результате быстрого разряда и сопутствующего ему выделения энергии температура катушек тороидального поля и их кожухов повышается до 50 К. При этом необходимо организовать охлаждение в целях снижения температуры этих элементов до рабочего уровня.

Разработан специальный процесс охлаждения обмоток и кассет (кожуха) катушек тороидального поля и параллельно установленных катушек полоидального поля. Задачей этого процесса является максимальное снижение времени охлаждения. Процесс охлаждения разделяется на два этапа:

1) охлаждение от 50 до 10 К. На этой стадии гелиевые ожижители работают с максимальной холодопроизводительностью, равной 72 кВт;

2) охлаждение от 10 до 4,5 К осуществляется закритическим гелием. На этой стадии гелиевые ожижители работают с максимальной производительностью (по жидкому гелию), составляющей 0,2 кг/с.

На первом этапе охлаждения часть вырабатываемого холода (около 20 кВт) требуется для поддержания катушек полоидального поля при температуре 4,5 К, а другая часть (52 кВт) расходуется для охлаждения обмоток и кассет катушек тороидального поля. Масса охлаждаемых 18 катушек и их кожухов равны 1,71 и 1,84 т соответственно. При этом 25 кВт холода требуется для охлаждения катушек и 27 кВт – для охлаждения кожухов (кассет).

В начале второго этапа охлаждения тепловая нагрузка ожижителя ниже 72 кВт, хотя при этом поток гелия через обмотки и кассеты катушек возрастает. На этой стадии гелий накапливается в холодном танке и повторно ожижается для заполнения каналов охлаждения катушек и кассет тороидального поля закритическим гелием с температурой 4,5 К и давлением 0,5 МПа. Требуется также 20 кВт холода для обмоток полоидального поля и криостата.

Анализ тепловых и гидравлических переходных процессов позволил определить время охлаждения катушек тороидального поля при установленной постоянной тепловой нагрузке ожижителя-рефрижератора 25 кВт. Массовый расход гелия при этом изменяется от максимального до минимального.

На основе использования кода VINCENTA (версия 3.9) получено также следующее:

- время охлаждения катушек тороидального поля от 50 до 10 К составляет 28 ч;

- требуется 12 ч для заполнения жидким гелием с температурой 4,5 К резервуара вместимостью около 40 м³, если производительность гелиевого ожижителя равна 0,1 кг/с.

Ожидается, что время охлаждения кассет катушек тороидального поля будет таким же, так как массы этих двух элементов примерно одинаковые.

Принимая во внимание вышеизложенное, следует считать, что весь период охлаждения катушек и кассет тороидального поля будет составлять от 2 до 2,5 дней.

11.6. Криостат

Реактор помещается в термостатируемый сосуд – криостат. Криостат создает вакуумную среду, позволяющую избежать чрезмерных тепловых нагрузок на компоненты, работающие при криогенных температурах, такие как сверхпроводящие магнитные системы, теплозащитные экраны и т.д., за счет теплопроводности газов и конвекции.

Принципы проектирования криостата прежде всего основаны на минимизации затрат и функциональности. Криостат представляет собой одностенный цилиндрический вакуумный сосуд с вертикальной осью, плоским дном и торосферической верхней крышкой. Общий вид криостата показан на рис. 11.9.

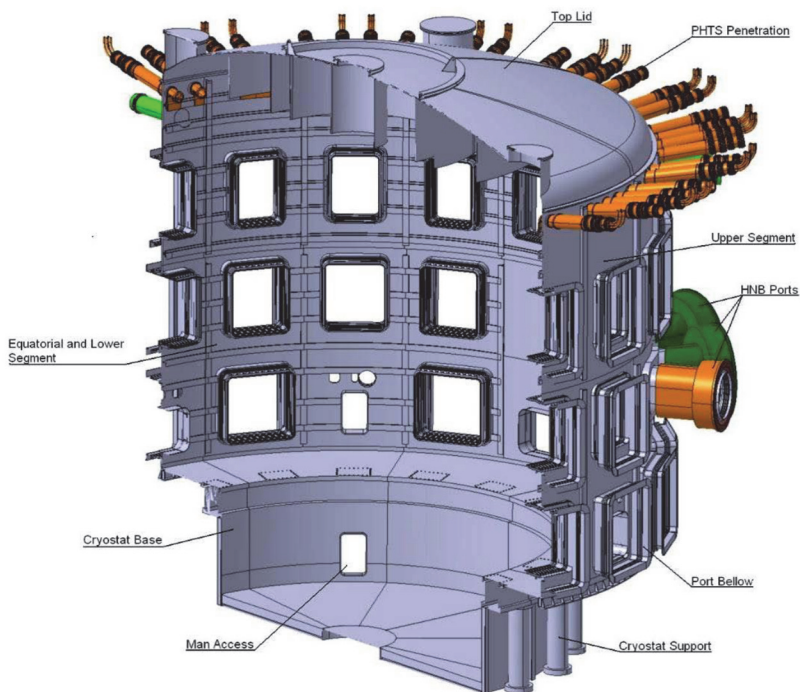


Рис. 11.9. Общий вид криостата

Его внутренний диаметр ~ 28 м определяется размером самого большого компонента, расположенного внутри полоидальных катушек возбуждения PF3 и PF4, с дополнительным небольшим радиальным зазором примерно в 1 м для облегчения установки компонентов и обеспечения доступа для ремонта на месте. Его внутренняя высота составляет ~ 29 м. Криостат представляет собой полностью сварной корпус из нержавеющей стали с большим количеством горизонтальных отверстий для доступа к вентиляционным

отверстиям на трех уровнях и дополнительными горизонтальными отверстиями для работы трубопроводов охлаждающей жидкости на верхнем и нижнем уровнях, а также линий ввода криораспределительной системы и токовых криовводов к магнитам на верхнем и нижнем уровнях. Кроме того, отверстия для доступа персонала в случае ремонта или осмотра предусмотрены в нижнем цилиндре криостата для горизонтального и вертикального входа и в верхней крышке криостата для вертикального входа.

Воздуховоды большого размера (3×2 м) соединяют порты вакуумной камеры с соответствующими каналами в корпусе криостата. Сильфон большого размера встроен в воздуховод для компенсации термических напряжений. Эти сильфоны имеют прямоугольную форму, изготовлены из материалов из нержавеющей стали.

Криостат поддерживается зданием и окружен бетонным биозащитным экраном. Биозащитный экран простирается над криостатом и включает в себя плиту толщиной 1,2 м над криостатом, которая поддерживается зданием. Диаметр цилиндра криостата под вакуумной камерой уменьшается за один шаг до ~19 м, что обуславливается обеспечением прочного бокового соединения между опорами машины и зданием, чтобы свести к минимуму боковые перемещения при расчетных нагрузках, включая сейсмические явления. Клапаны, токоподводы и контрольно-измерительные отсеки расположены в галереях непосредственно за пределами биозащитного поля.

Основные параметры криостата: внутренний диаметр – 28 м, высота – 29 м, толщина оболочки – 50÷60 мм, количество портов – 45, размеры портов (высота × ширина) – 3 × 2 м, материал – SS 304 L, общий вес – 3050 т.

Криостат должен выдерживать индивидуальные и комбинированные условия нагрузки как при нормальной, так и при ненормальной работе. Основываясь на анализе, проведенном на сегодняшний день, криостат, по-видимому, конструктивно способен выдерживать ожидаемые нагрузки. Однако для подтверждения структурной целостности несущей конструкции криостата требуется дальнейший анализ.

11.7. Методика расчета основных параметров КГУ-О-Р

Рефрижератор КГУ-О-Р является трехконтурным с давлением прямого потока $p_m = 1,9$ МПа, давлением обратного потока $p_n = 0,11$ МПа и давлением промежуточного контура, в котором циркулирует отборы в детандеры второй и третьей ступеней предварительного охлаждения, $p'_m = 0,36$ МПа.

В качестве исходных данных в расчетах КГУ задаются холодопроизводительность установки и условия выдачи сконденсированного продукта (при атмосферном или повышенном давлении) для ожижителей, а для рефрижераторного режима задаются холодопроизводительность и температурный уровень криостатирования. Кроме этого, в зависимости от выбранной схемы принимаются дополнительные исходные данные, число которых зависит от конкретной схемы.

Исходные данные для расчета

Холодопроизводительность установки составляет Q_0 , Вт, на температурном уровне T_0 , К.

В качестве дополнительных исходных данных принимаем:

- 1) изотермический КПД компрессора $\eta_{из}$;
- 2) адиабатный КПД детандеров $\eta_{ад1} = \eta_{ад2}$;
- 3) температура, поступающего после холодильника компрессора газа T_2 ;
- 4) разность между температурами потоков на уровне $T_3 = T_{о.с.}$, а также на уровнях выхода газа из детандеров и на уровне холодного среза азотной ванны принимаем по уравнению

$$\Delta T_{m-n} = aT_n,$$

где ΔT_{m-n} – разность между температурами прямого и обратного потоков; T_n – температура обратного потока; a – постоянный коэффициент, рекомендуемое значение $a = 0,03 \div 0,05$;

- 5) теплоприток через изоляцию рассчитывается как часть холодопроизводительности установки на соответствующем уровне: $q_{из} = b\Delta h_i$; рекомендуемое значение $b = 0,05 \div 0,07$;

б) гидравлическими сопротивлениями аппаратов в первом приближении пренебрегают.

В рассматриваемой схеме криогенной установки СПО является трехступенчатой (азотная ванна – первая ступень, детандеры Д1, Д2 – вторая и третья ступени соответственно).

Схема расчета

1. Расчет сложных схем криогенных установок целесообразно проводить в направлении «снизу-вверх», начиная от нижнего температурного уровня. Обычно расчет удобно выполнять для единичного расхода потока теплоносителя, т.е. $G = 1 \text{ кг/с}$ или $G = 1 \text{ г/с}$ (для КГУ с невысокой холодопроизводительностью).

2. Перед расчетом установок необходимо определить температурные уровни включения детандеров, т.е. значения температур на выходе газа из детандеров. На основе предварительно проведенных расчетов и оптимизации гелиевых ожижителей и рефрижераторов, а также практической реализации установлено, что диапазон оптимальных температур обратного потока гелия после Д2 довольно узок $T_{n*} = 8 \div 12 \text{ К}$ в случае ввода дополнительно охлажденного отбора $m_{Д2}$ в обратный поток. В варианте трехконтурной КГУ к этому

значению вводится поправка $T_n = T_{n*} \sqrt[n]{\frac{P_m}{P_n}}$.

3. Температуру гелия после i -го детандера определяют по уравнению Капицы:

$$T_i = \sqrt[n]{T_{\text{о.с.}}^{n-i} T_n^i}, \quad (11.1)$$

где n – число ступеней СПО ($n = 3$ азотная ванна плюс два детандера); i – порядковый номер ступени предварительного охлаждения по ходу прямого потока; T_n – температура газа на выходе из последнего (нижнего) детандера. В рассматриваемом случае $T_n = T_7$. Расчеты по (11.1) дают значение $T_5, \approx 46 \text{ К}$, а в реализуемой схеме КГУ-О-Р это значение с целью повышения холодопроизводительности вспомогательного контура принято $T_5, = -42 \text{ К}$.

4. При расчете схема криогенной установки разделяется на контуры (рис. 11.5). Основой для выбора границ расчетных контуров является возможность определения температур потоков на их границах.

5. Уравнение энергетического баланса контура между точками 8–14 и 15–8 (рис. 11.5) для 1 кг массы газа, поступающего на дросселирование, имеет вид

$$1 \cdot h_8 + q_0 + q_{из}' = 1 \cdot h_{10}, \quad (11.2)$$

откуда (добавив $\pm h_8'$) получаем

$$q_0 = 1 \cdot h_{10} - 1 \cdot h_8 - q_{из}' = \Delta h_T' - \Delta h_n' - q_{из}', \quad (11.3)$$

где $q_{из}'$ – теплоприток к контуру a , который принимаем как долю от изотермического дроссель-эффекта $\Delta h_T' = h_8' - h_8$,

$q_{из}' = (0,05 - 0,07)\Delta h_T'$; $\Delta h_n' = h_8' - h_{10}$ – величина недорекупации.

При этом значение T_7 принимается в соответствии с вышеиз-

ложенными рекомендациями, а $T_8 = T_8'(1 + a)$ и $T_{18} = T_8' \frac{1}{1 + a}$. По этим

значениям температур по термодинамическим таблицам гелия определяются соответствующие значения энтальпий.

6. Из уравнения (11.3) находится значение удельной холодопроизводительности q_0 , если известно давление p_m прямого потока. Давление обратного потока p_n однозначно определяется температурой криостатирования T_0 .

В первом приближении p_m находится из условия максимального значения q_0^{\max} . А $q_{из}'$ определяется после нахождения $\Delta h_T'$. Значение $\Delta h_T'$ сильно зависит от принятого значения p_m . Максимальное значение q_0 определяется исходя из положения о максимальном изотермическом дроссель-эффекте при принятом значении давления прямого потока, по уравнению

$$\left(\frac{\partial q_0}{\partial p_m} \right)_T = \left(\frac{\partial (\Delta h_T')}{\partial p_m} \right)_T = - \left(\frac{\partial h_8'}{\partial p_m} \right)_T = 0. \quad (11.4)$$

Графически изменение Δh_T с ростом давления p_m проиллюстрировано на рис. 11.10.

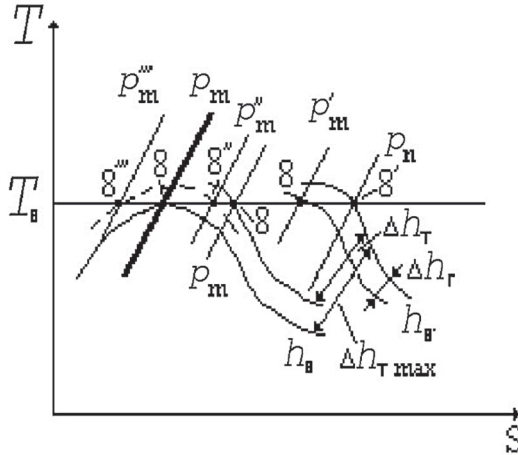


Рис. 11.10. Зависимость изотермического дроссель-эффекта Δh_T от давления прямого потока p_m

Значение Δh_T с ростом p_m увеличивается до некоторой максимальной величины Δh_T^{\max} . Точка, соответствующая Δh_T^{\max} (при фиксированном положении точки $8'$), находится на максимуме изоэнтальпы при температуре T_8 . Изобара p_m , проходящая через эту точку, и соответствует тому давлению, при котором в установке обеспечивается q_0^{\max} . Заметим, что q_0^{\max} не может являться критерием термодинамического совершенства установки. Таким критерием служит эксергетический КПД η_e или удельный расход энергии на отвод единичного теплового потока q_0 при заданной температуре T_0 . Эти характеристики рефрижератора будут приведены ниже.

Таким образом, значение p_m , соответствующее q_0^{\max} , выбирается в качестве первого приближения давления прямого потока, затем по (11.3) определяется значение q_0 . Значение h_8 определяется по T, S -диаграмме или по термодинамическим таблицам.

7. Из энергетического баланса контура между точками 8 и 6' (рис. 11.5) находится количество газа $m_{Д2}$, поступающего в детандер Д2 при условии, что на дросселирование идет 1 кг массы газа:

$$1 \cdot h_6 + 1 \cdot h_{11} + m_{Д} \cdot h_6'' + q_{из}'' = m_{Д} \cdot h_{11} + 1 \cdot h_8 + 1 \cdot h_8 \quad (11.5)$$

В (11.5) неизвестны $m_{Д2}, h_7, q_{из}''$. Значение энтальпии h_7 определяется с использованием заданного адиабатного КПД детандера

$$\eta_{ад} = \frac{h_7 - h_6}{h_7 - h_6''}, \quad (11.6)$$

где h_6'' – энтальпия теплоносителя при идеальном расширении в детандоре Д2.

Для решения (11.6) применяют методы итерации или графический метод: задают значение температуры T_7 , находят энтальпии h_7, h_7', h_7'' и сопоставляют правую часть уравнения с левой. Соблюдение равенства означает, что T_7 выбрано правильно. Если равенство не соблюдается, задают новое значение T_7 и расчет повторяют. Теплоприток к контуру: $q_{из}'' = (0,05 \div 0,07)(h_7 - h_{15})$. Значение температуры $T_7 = T_n$ принято по вышеописанной процедуре, T_8 и T_{18} определены выше. По температуре T_5 определяются значения температур $T_6 = T_5(1+a)$, $T_{20} = T_5 \frac{1}{1+a}$. Далее по уравнению (11.5) определяется значение $m_{Д2}$.

Из уравнения энергетического баланса контура между точками 6 и 4 (рис. 11.5) находят количество газа, поступающего на первый детандер:

$$\begin{aligned} (1 + m_{Д1} + m_{Д2})h_4 + 1 \cdot h_{20} + m_{Д1}h_5'' + q_{из}'' = \\ = m_{Д1}h_5 + (1 + m_{Д2})h_6 + 1 \cdot h_{22} + (m_{Д1} + m_{Д2})h_{23} \end{aligned} \quad (11.7)$$

Из уравнения (11.7) находят $m_{Д1}$, причем неизвестные значения $T_5, q_{из}'''$ определяются аналогично T_7 и $q_{из}''$.

Уравнение (11.8) для адиабатного КПД детандера Д1 решается аналогичным образом

$$\eta_{\text{ад}} = \frac{h_5 - h_{5'}}{h_5 - h_{5s}}, \quad (11.8)$$

где h_{5s} – энтальпия гелия при идеальном адиабатическом расширении в Д1. В уравнении (11.7) неизвестные температуры определяются по соотношениям

$$T_{12'} = T_4 \frac{1}{1+a}, \quad T_{12} = T_4 \frac{1}{(1+a)^2}.$$

Для определения количества жидкого азота m_{N_2} , поступающего на предварительное охлаждение в азотную ванну, необходимо составить уравнение энергетического баланса для контура "d":

$$\begin{aligned} (1 + m_{\text{Д1}} + m_{\text{Д2}})h_2 + (m_{\text{Д1}} + m_{\text{Д2}})h_{12'} + 1 \cdot h_{12} + q_{\text{из}}'' &= \\ = (1 + m_{\text{Д1}} + m_{\text{Д2}})h_4 + (m_{\text{Д1}} + m_{\text{Д2}})h_2 + 1 \cdot h_1. \end{aligned} \quad (11.9)$$

В (11.9) в стационарном режиме работы $m_{N_2}^{\text{г}} = m_{N_2}^{\text{ж}}$, а $h_{N_2}^{\text{г}} - h_{N_2}^{\text{ж}} = \Gamma_{N_2}^*$; $\Gamma_{N_2}^*$ – теплота фазового перехода. Из решения уравнения (11.9) находится потребное количество жидкого азота.

После нахождения параметров потока во всех необходимых точках схемы определяют эксергетический КПД установки по соотношению:

$$\eta_{\text{е}} = \frac{l_{\text{ид}}}{l_{\text{р}}},$$

где $l_{\text{ид}}$, $l_{\text{р}}$ – соответственно удельная идеальная и реальная работы, затрачиваемые на криостатирование 1 кг криогенной жидкости.

Значение идеальной работы (по модулю) определяется по уравнению:

$$l_{\text{ид}} = q_0 \frac{T_{\text{ос}} - T_0}{T_0}, \quad (11.10)$$

а реальной работы (по модулю), затрачиваемой для отвода q_0 :

$$l_p = (1 + m_{D_1} + m_{D_2}) \frac{1}{\eta_{из}} R_{\mu} T_{ос} \ln p_m / p_n - l_D, \quad (11.11)$$

где $\eta_{из} = 0,6$ – изотермический КПД компрессора; R_{μ} – индивидуальная газовая постоянная; l_D – полезно используемая работа расширения газа в детандерах:

$$l_D = l_{D_1} + l_{D_2} = m_{D_1} (h_5 - h_{17}) \eta_{эм} + m_{D_2} (h_7 - h_{15}) \eta_{эм}, \quad (11.12)$$

где $\eta_{эм} = 0,8$ – КПД электромеханической передачи. Работу расширения газа в детандерах часто полезно не используют из-за сложности преобразования механической энергии в электрическую с необходимыми для электрической сети параметрами. В этих случаях $l_D = 0$, а тормозом для детандера служит газодувка или масляный насос.

После определения η_e задаются другим значением p_m (несколько меньшим, чем p_m , соответствующее q_0^{max}) и расчет повторяют.

Затем строят график зависимости $\eta_e = \eta_e(p_m)$ (рис. 11.11), по которому и определяется оптимальное значение p_m . Это давление p_m может соответствовать η_e^{max} или быть несколько меньшим, например, исходя из условий подбора реального компрессора.

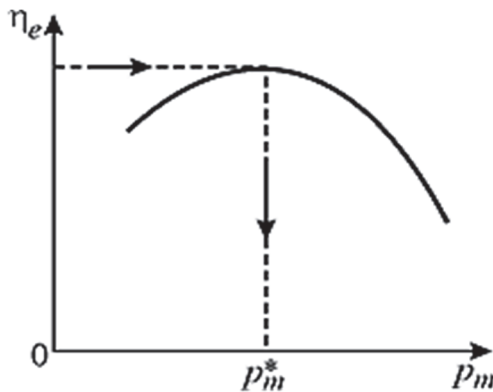


Рис. 11.11. Зависимость энергетического КПД от давления прямого потока

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные параметры СКО инжектора быстрых нейтральных атомов.
2. Приведите блок-схему СКО инжектора быстрых нейтральных атомов.
3. Каков способ охлаждения криопанелей инжектора?
4. Какова примерная структура СКО больших токамаков?
5. Сравните параметры СКО при охлаждении СОТП двухфазным и закритическим гелием.
6. Назовите основные параметры СКО ИТЭР.
7. Какова структура системы криолиний в ИТЭР?
8. Опишите схему конструкции кольцевого трубопровода ИТЭР.
9. Каковы особенности оживителя-рефрижератора ИТЭР?
10. Назовите тип сверхпроводника, примененного в Т-7.
11. Назовите тип сверхпроводника, примененного в Т-15.
12. В чем заключается технология изготовления сверхпроводника Т-15?
13. Из какого материала сверхпроводник Торес Супра?
14. Каковы основные достижения сверхпроводника, примененного в Т-7?
15. Какие материалы используются в СМС ИТЭР?
16. Какие обязательства РФ в создании СМС ИТЭР?

Список рекомендуемой литературы

1. Комов, А.Т. Вакуумные и криогенные системы термоядерных установок и реакторов / А.Т. Комов. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
2. Теория и расчет криогенных систем: учебник для вузов / А.М. Архаров и др. – М.: Машиностроение, 1978.
3. Фролов, Г.С. Вакуумные системы и их элементы: справочник-атлас; под ред. В.Д. Лубенца. – М.: Машиностроение, 1968.

Глава 12. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС И СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Инфраструктура ИТЭР обеспечивает безопасную эксплуатацию всех систем ИТЭР, их техническое обслуживание, вывод из эксплуатации. В число этих систем входит стационарная электрическая сеть и другие источники электропитания.

Для реализации проекта ИТЭР создана система электропитания, в которой учтены не только объемы мощности, потребляемой различными системами, но и влияние элементов этих систем друг на друга и на сеть в целом, что возможно за счет токов высших гармоник и большой реактивной мощности комплекса. Из-за специфических нагрузок особое внимание уделяется устройствам коммутации и защиты, в том числе оперативно выводящих огромную энергию, запасенную в обмотках, при возможных аварийных ситуациях. Многие системы на такой мощности будут апробированы впервые.

12.1. Системы электропитания

Система питания ИТЭР будет состоять из следующих основных подсистем:

- Сеть кратковременного электропитания.
- Сеть стационарного электропитания.
- Источники постоянного тока для питания катушек магнитного поля.
- Компенсаторы реактивной мощности и фильтры высших гармоник.

По сети кратковременного электропитания будет снабжаться переменным током все катушки магнитного поля, система нагрева плазмы и увлечения тока плазмы. В этой же сети от управляемых источников постоянного тока будут питаться сверхпроводящие катушки магнитного поля, внутрикамерные обмотки и часть систем нагрева и генерации неиндуктивного тока плазмы.

Стационарная сеть электропитания будет обеспечивать питание переменным током прочих нагрузок, таких как двигатели (в первую очередь), система водяного охлаждения, криогенная станция и т.д. Резервное питание будет подсоединяться к отдельному источнику.

Источники питания катушек магнитного поля обеспечивают подачу регулируемого постоянного тока на катушки тороидального и полоидального полей (ТП и ПП), модули центрального соленоида (ЦС), устройства быстрой разрядки и заземления.

Компенсаторы реактивной мощности и фильтры высших гармоник используются для уменьшения реактивной мощности и снижения искажений напряжения в сети.

Основными функциями сети переменного тока и источников питания катушек и являются:

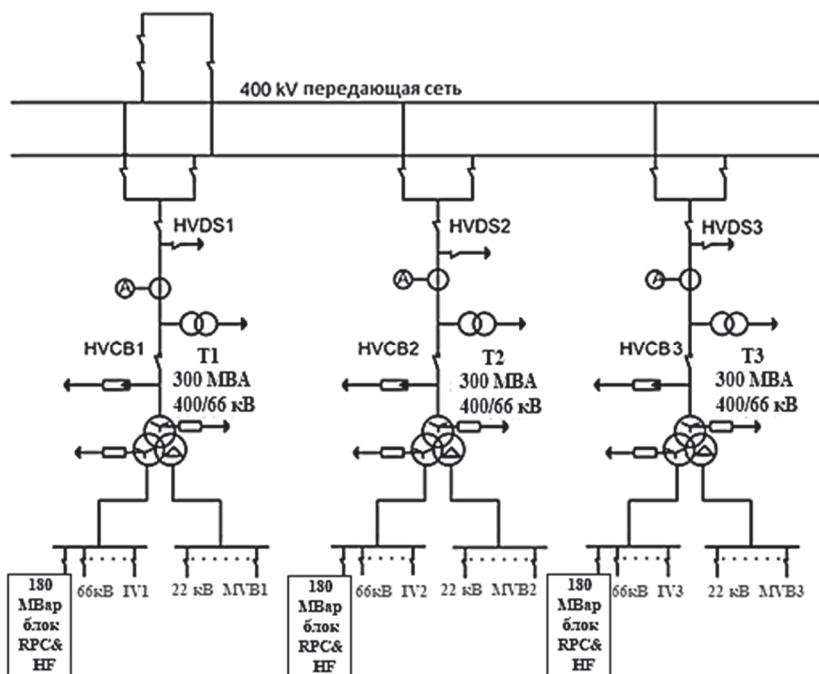
- подача электроэнергии на токамак ИТЭР и в его системы;
- защита токамака и его систем в случае электрической неисправности и потери сверхпроводимости в катушках;
- обеспечение надлежащего заземления токамака и компонентов источников питания.

Сети кратковременного и стационарного питания будут подключены к национальной французской электросети на напряжении 400 кВ, эксплуатируемой компанией RTE (национальный оператор систем электропередачи). Кратковременный отбор мощности будет составлять порядка 200 МВАр для сети переменного тока, в дополнение к стационарной мощности 500 МВт, необходимой для предварительно запрограммированных сценариев питания катушек полоидального поля, контроля тока, положенияи формы плазмы, включая вертикальную стабилизацию, системы нагреваи увлечения тока плазмы, катушек сверхпроводящих магнитови внутрикамерной обмотки.

Сеть кратковременного электропитания

Для сети кратковременного электропитания напряжение 400 кВ преобразуется с помощью трех понижающих трансформаторов мощностью 300 МВА каждый, в промежуточное напряжение (IV) 66 кВ

(вторичная обмотка соединена звездой) и в среднее напряжение (МВ) 22 кВ (третичная обмотка соединена треугольником). Упрощенная однолинейная схема сети показана на рис. 12.1.



**Рис. 12.1. Однолинейная схема сети кратковременного электропитания.
RPC&HF – 180 МВАр компенсаторы реактивной мощности
и фильтры высших гармоник**

Большинство нагрузок будут распределены между тремя шинами 66 кВ. Это преобразователи AC/DC для магнитных катушек тороидального поля (ТП), центрального соленоида (ЦС), полоидального поля (ПП) и корректирующих обмоток (ОС), а также для источника питания систем нагрева плазмы и увеличения тока плазмы. Нагрузки меньшей мощности, ориентировочно менее 20 МВА, будут подключены к шинам среднего напряжения 22 кВ.

Компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник

Сеть кратковременного электропитания включает в себя несколько преобразователей AC/DC, генерирующих реактивную мощность и создающих токи высших гармоник. Уровень этой генерации и помех превышает допустимый уровень, установленный для французской электросети 400 кВ. Именно для решения этой проблемы будет установлен компенсатор реактивной мощности и фильтр высших гармоник (RPC&HF). Предполагается, что применение этих устройств обеспечит выполнение условий соглашения между RTE и агентством ITER France. Эта система компенсаторов будет одной из крупнейших в мире.

Блоки RPC&HF подключены к шинам 66 кВ (по одному блоку на каждую шину) и основаны на технологии статической компенсации реактивной мощности (SVC). По сравнению с традиционным SVCs, ITER RPC&HF не нуждается в конденсаторах с тиристорной коммутацией (TSC) для генерации «индуктивной» реактивной мощности, что обеспечивает снижение капиталовложений, но при этом конденсаторные батареи в качестве фильтров высших гармоник должны быть постоянно подключены к сети кратковременного электропитания.

Принимая во внимание ожидаемое развитие конструкции индуктивных накопителей энергии с тиристорным управлением (TCR), они будут напрямую подключены к шинам 66 кВ. Это позволит отказаться от применения понижающих трансформаторов. Недостатком этой схемы является то, что работа TCR от трехфазного питания будет генерировать токи 5-й и 7-й гармоник, и потребуются соответствующие фильтры высших гармоник, но с точки зрения удобства эксплуатации и экономической эффективности, применение TCR на напряжении 66 кВ более выгодно.

На однолинейной схеме на рис. 12.2 показано подключение к шине 66 кВ RPC&HF мощностью 200÷250 МВА, состоящего из TCR и 6 LC-фильтров. Системы RPC&HF подключаются к каждой из шин 66 кВ.

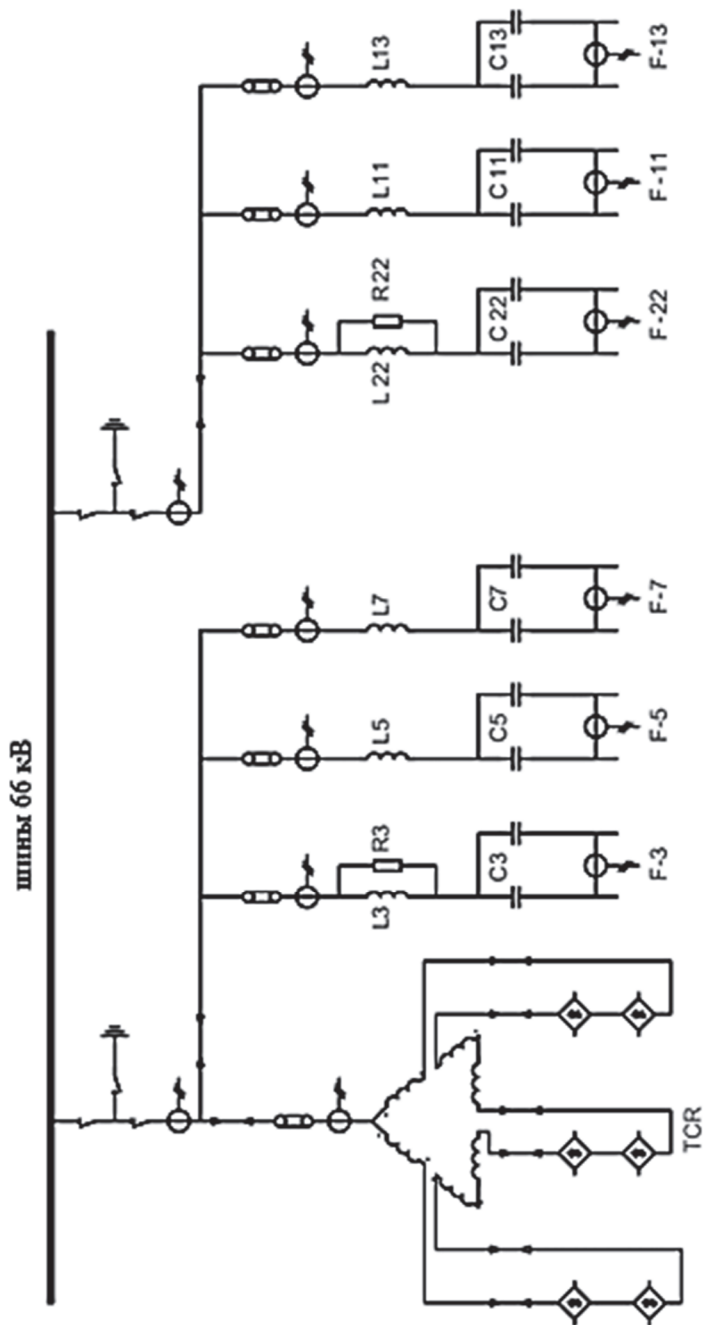


Рис. 12.2. Однолинейная схема подключения устройства компенсации реактивной мощности и фильтров высших гармоник (RPC & HF) к шинам 66 кВ

Источники питания катушек магнитного поля

Источники питания катушек будут включать в себя девять систем для подачи регулируемого постоянного тока на обмотки тороидального и полоидального полей и в модули центрального соленоида:

- один общий источник питания для восемнадцати катушек тороидального поля;

- одна общая система источников питания для верхнего и нижнего модулей центрального соленоида CS1, соединенных последовательно;

- четыре системы для модулей центрального соленоида: CS2 – верхний, CS2 – нижний, CS3 – верхний и CS3 – нижний;

- две системы источников питания для питания катушек катушек полоидального поля PF1 и PF6;

- одна общая система для четырех внешних катушек полоидального поля, а именно для PF2, PF3, PF4 и PF5, используемых для вертикальной стабилизации плазмы.

Также девять относительно небольших систем источников питания с очень похожими конфигурациями будут снабжать корректирующие обмотки.

Система питания катушки тороидального поля

Восемнадцать катушек тороидального поля соединены в девять групп, пары катушек соединены последовательно внутри криостата. Катушки питаются регулируемым постоянным током от 12-импульсного 2-квadrантного тиристорного преобразователя, рассчитанного на ток 68 кА и напряжение холостого хода 900 В (рис. 12.3). Когда катушки тороидального поля будут заряжены и ток достигнет требуемого установившегося значения, конфигурация преобразователя будет оптимизирована для снижения реактивной мощности. Минимальное время разряда, составляющее около 30 минут, будет обеспечено за счет работы преобразователя в инверсионном режиме. Энергия, запасенная в катушках тороидального поля при максимальном токе (68 кА), составляет около 41 ГДж.

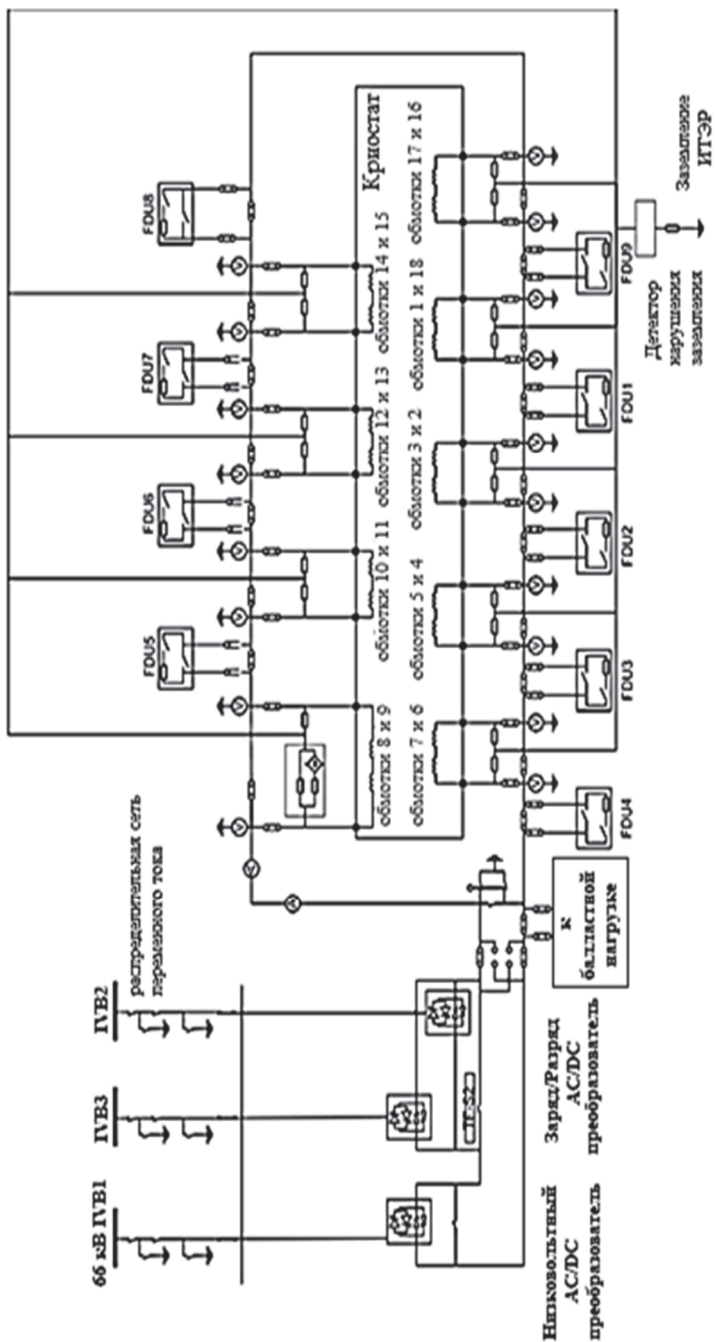


Рис. 12.3. Система питания обмотки тороидального поля

В случае потери сверхпроводимости (гашения сверхпроводимости, *quench*) или другого отказа в источнике питания, необходимо немедленно вывести энергию из обмотки. За это отвечают девять блоков быстрого защитного вывода энергии (блоки быстрой разрядки, *Fast Discharge Units* – FDU), чередующихся последовательно с каждой парой катушек. Эти FDU состоят из выключателей и разрядных резисторов, рассчитанных на поглощение энергии в 35 ГДж и обеспечивающих разрядку с эквивалентной постоянной времени 11 с. Часть энергии катушки, около 5 ГДж, будет рассеиваться в вакуумной камере, на радиальных пластинах и корпусе катушки тороидального поля, а также на других пассивных компонентах. Максимальное напряжение на разрядных резисторах не должно превышать 8 кВ.

В каждый FDU входят два выключателя, соединенных последовательно. Первый, называемый блоком коммутации тока, рассчитан на многократные срабатывания. Он замыкается при обнаружении потери сверхпроводимости. В случае если первому выключателю не удастся разорвать ток, второй выключатель (пироразрыватель, автоматический выключатель с взрывным приводом) прервет ток. Выключатель с взрывным приводом обладает высокой эффективностью, но не пригоден для многократного срабатывания.

Автоматические выключатели для FDU расположены в здании токамака рядом с терминалами, содержащими выводы обмотки. Там же расположен быстродействующий выключатель, который замыкается одновременно с инициированием защитного вывода энергии. Он замыкает разрядный контур в пределах зоны, рассчитанной на сейсмическую нагрузку, и отсоединяет его AC/DC и шин.

Конденсаторные батареи, используемые для создания «защелки» в блоке коммутации тока, расположены рядом с переключателями в галерее здания токамака и подключены к переключателям через коаксиальные кабели. Разрядные резисторы расположены в здании со стальным каркасом (за пределами комплекса токамак) и также подключены к переключателям коаксиальными кабелями.

Другие мероприятия, направленные на предотвращение повреждения катушки, включают, в частности, использование конденсаторов и емкостей со сжатым газом, которые обеспечивают автономную работу электромагнитных и пневматических приводов, резервирование и бесперебойное питание контрольно-измерительных приборов, устройств управления и других систем. Более того, многочисленные «линии обороны» предусмотрены для обнаружения и защиты от перегрузки по току в обмотках тороидального поля, а также для контроля отклонения от нормальных условий работы источников питания, например, при перегреве шин, снижении расхода охлаждающей воды и т.д.

Источники питания для модулей центрального соленоида и катушек полоидального поля PF1 и PF6

Эти источники питают либо один модуль центрального соленоида CS или катушку полоидального поля PF (рис. 12.4) для системы PF1, либо питают два модуля последовательно (рис. 12.5).

Напряжение обхода, необходимое для пробоя и инициирования плазмы в вакуумной камере, получается путем переключения резисторов на последовательное соединение с модулями центрального соленоида и катушками полоидального поля PF1, PF6. Это обеспечивает поступление около 2 ГВт энергии. Эти цепи, называемые коммутационными (*switch network – SN*), содержат автоматические выключатели и резисторы. Преобразователи переменного/постоянного тока также будут использоваться при инициировании плазмы, при наличии каких-либо ограничений в энергетических возможностях сети кратковременного электропитания. После инициирования плазмы мощность, необходимая для регулирования тока, формы и положения плазмы, обеспечивается 12-импульсным, 4-квadrантным тиристорным преобразователем, рассчитанным на постоянный ток 45 кА и напряжение холостого хода 2 кВ. FDU для сброса энергии катушек идентичны тем, которые используются для защиты обмотки тороидального поля.

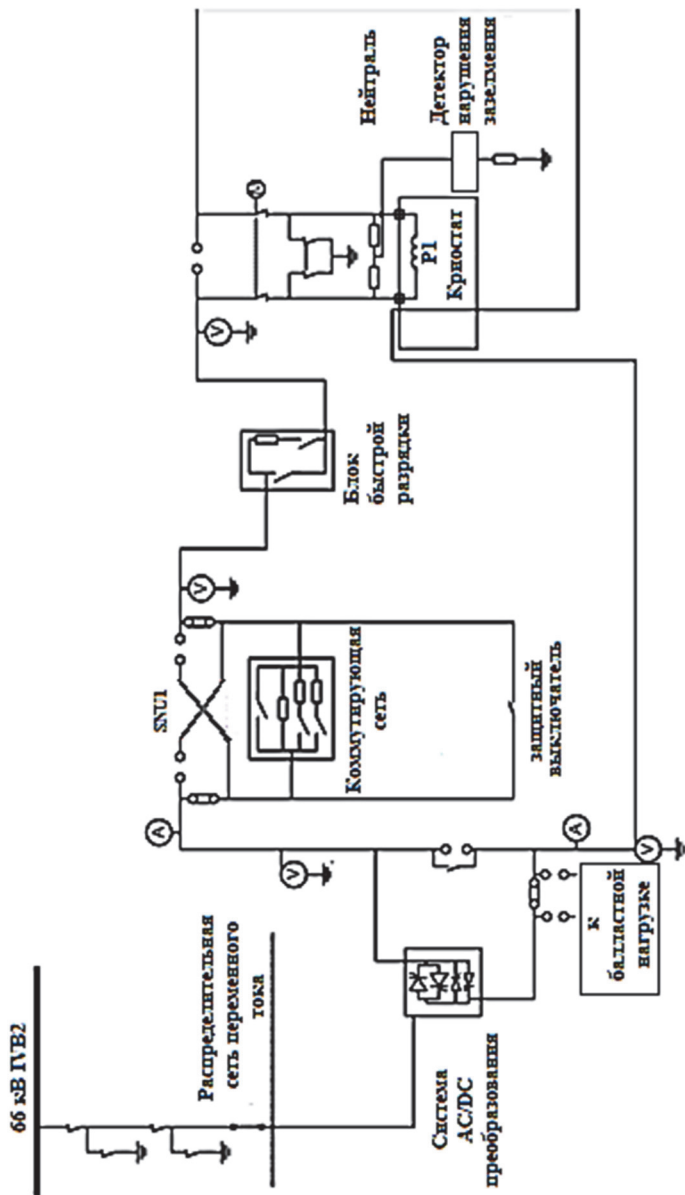


Рис. 12.4. Источник питания обмотки полюсодального поля

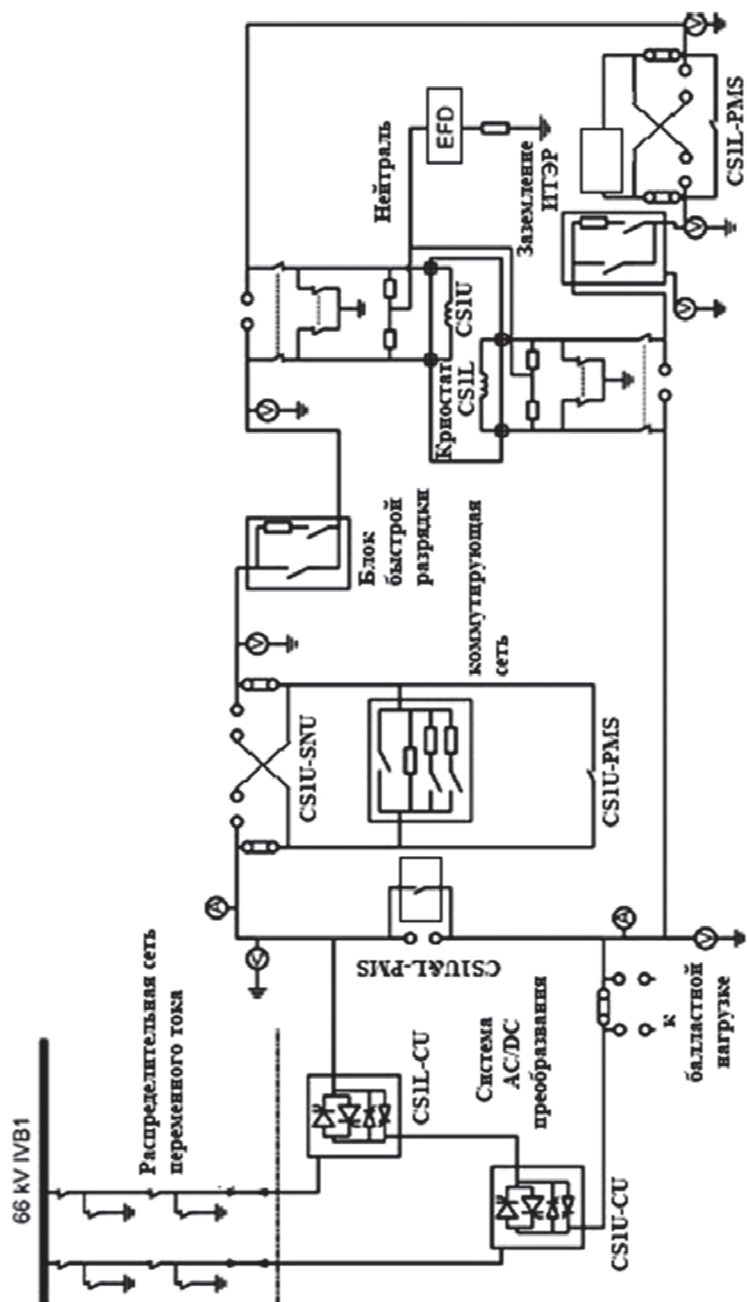


Рис. 12.5. Источник питания модулей центрального соленоида

Быстрая разрядка с эквивалентной постоянной времени 7,5 с для катушек центрального соленоида и 14 с для катушек полоидального поля реализуется при напряжении не превышающим 7 кВ. Максимальная энергия, рассеиваемая в разрядных резисторах, находится в диапазоне $1 \div 2$ ГДж на систему.

Система питания обмоток полоидального поля PF2-PF5

Квазисимметричное распределение токов в этих обмотках позволяет использовать один быстродействующий тиристорный преобразователь, предназначенный для вертикальной стабилизации плазмы, подключенный к обмоткам PF2–PF5 в интегрированной системе электропитания, как схематически показано на рис. 12.6.

Две пары квазисимметричных катушек (PF2–PF5 и PF3–PF4) соединены параллельно с преобразователем вертикальной стабилизации. Внутри каждой пары две катушки соединены антипараллельно. В этой схеме используются три типа тиристорных преобразователей. Основной преобразователь, рассчитанный на 55 кА, 2 кВ (без нагрузки), обеспечивает относительно медленное изменение тока катушки, необходимого для регулирования формы и величины тока плазмы. Его конструкция аналогична конструкции преобразователя CS/PF. «Бустерный» преобразователь создает относительно высокое напряжение (до 4,2 кВ при максимальном токе 10 кА), которое вместе с напряжением основного преобразователя создает условия, необходимые для пробоя при иницировании плазмы. Когда эта фаза заканчивается, бустерный преобразователь переключается в режим холостого хода и затем шунтируется. Наконец, быстродействующий преобразователь вертикальной стабилизации с номинальным током 22 кА создает напряжение до 6 кВ (без нагрузки) по запросу от системы управления плазмой с обратной связью.

FDU в этой схеме питания так же идентичны тем, которые были описаны ранее. В момент защитного вывода энергии, для защиты источников питания катушки полоидального поля, они шунтируются.

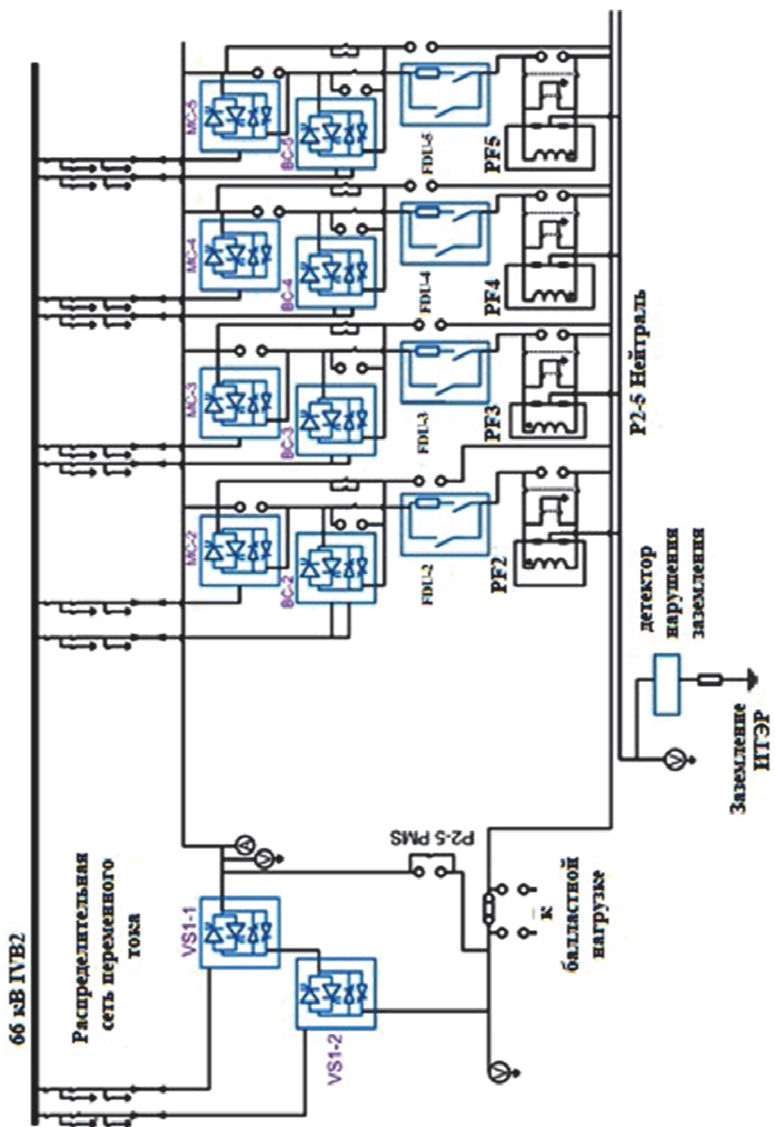


Рис. 12.6. Источник питания катушек полюсного поля РГ2-РГ5

Защитный вывод энергии в этой системе характеризуется эквивалентной постоянной времени 14 с, максимальным напряжением до 7 кВ и максимальной энергией на катушку 1,8 ГДж.

Система питания корректирующих катушек

В конструкцию магнитной системы включены три группы корректирующих обмоток (ССs) – верхняя, боковая и нижняя. Каждая группа состоит из шести идентичных модулей, сдвинутых тороидально относительно друг друга на 60° . Противоположные модули соединены последовательно, образуя вместе три верхних ССs (ССТ 1, 2 и 3), три боковых ССs (ССS 1, 2 и 3) и три нижних ССs (ССВ 1, 2 и 3). Каждый комплект СС имеет свою собственную систему питания, как схематично показано на рис. 12.7.

Все девять блоков питания корректирующих обмоток имеют одинаковую конфигурацию: преобразователь АС/DC подает на катушку постоянное питание. Действуя в режиме инверсии, он также обеспечивает быстрый вывод энергии из катушки в случае потери сверхпроводимости. Если преобразователь не справляется с этим, он будет зашунтирован выключателем, и энергия катушки будет рассеиваться на шинах. Постоянная времени в этом случае будет менее 20 с. Все преобразователи рассчитаны на ток 10 кА, но имеют разное выходное напряжение в диапазоне $50\div 450$ В, в зависимости от влияния катушек на стабилизацию неустойчивости резистивной моды (*resistive wall modes*).

Заземление обмоток

Для всех катушек предусмотрено заземление с помощью резисторов с высоким сопротивлением ($1\div 2$ кОм). Этот подход иллюстрируется схемой заземления катушек тороидального поля, показанной ранее на рис. 12.3.

Система катушек тороидального поля заземляется через набор идентичных резисторов, подключенных параллельно к каждой паре катушек. Их средняя точка подключена к нейтрали, которая представляет собой общую шину, подключенную к «земле» токамака ИТЭР, через один резистор (ЭР). Его сопротивление составляет около 1 кОм, чтобы ограничить ток замыкания на «землю» и соответствующую энергию дуги в случае однофазного повреждения изоляции заземления системы катушек тороидального поля.

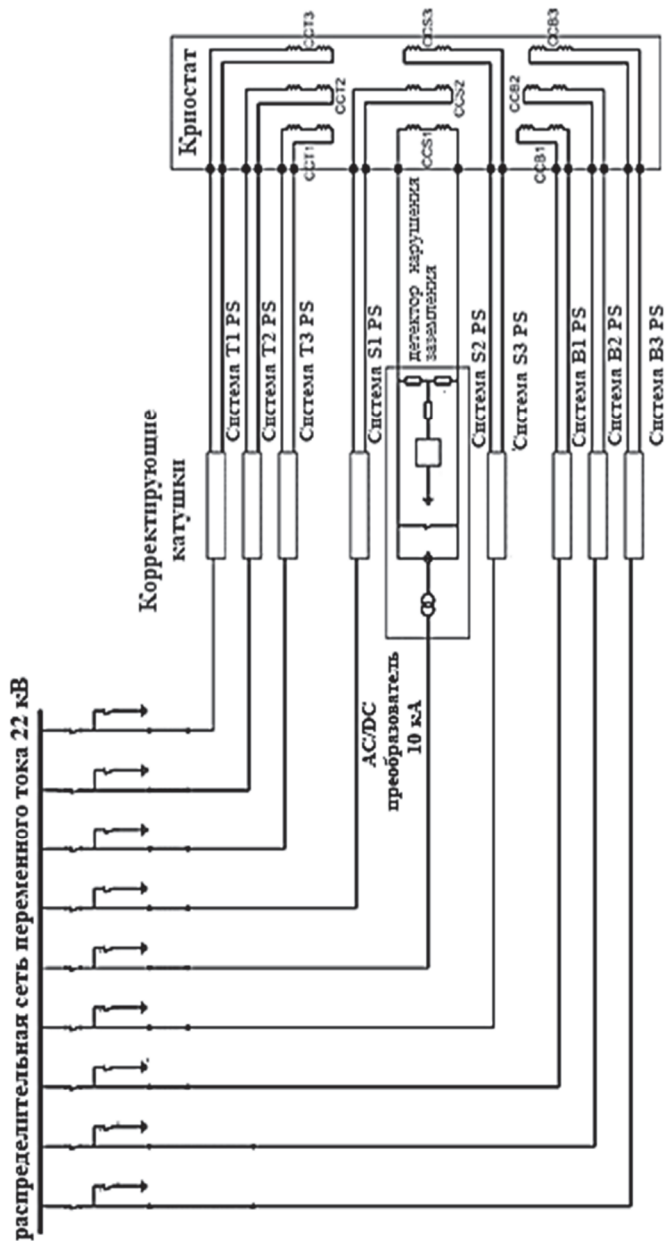


Рис. 12.7. Источник питания корректирующих катушек

Ток утечки на землю будет измерен и использован для обнаружения замыкания на землю. Аналогичная концепция используется для моделей центрального соленоида, катушки полоидального поля и корректирующих обмоток.

12.2. Компоненты

AC/DC преобразователи

Из-за различных условий эксплуатации в цепях обмоток тороидального и полоидального поля будут использоваться различные типы преобразовательных устройств с номинальными значениями тока от 10 до 68 кА и напряжением от 0,9 до 5,6 кВ. Несмотря на эти различия, при проектировании были использованы некоторые общие критерии.

В частности, преобразователи предназначены как для подавления неисправностей, так и для работы с внутренним нециклическим режимом холостого хода. Первое подразумевает возможность устранения перегрузки по току из-за внутренних неисправностей путем подавления импульсов затвора без срабатывания внутренних предохранителей, что облегчает эксплуатацию. Обычно преобразователи с одним тиристором на плечо работают без предохранителей, но в случае большого числа тиристоров, подключенных параллельно, необходимо провести дополнительные исследования.

Выключатели постоянного тока

Ключевым элементом системы сброса энергии из обмоток являются коммутаторы. Они используются как в коммутирующих сетях, так и в FDU. Эти выключатели постоянного тока рассчитаны на номинальный режим с током $45\div 68$ кА при напряжении $10\div 15$ кВ. Используется схема, состоящая из двух параллельных выключателей. Это шунтирующий выключатель с механическим приводом и импульсный автоматический выключатель, оснащенный противоимпульсной системой для создания искусственного «нулевого тока». Программа, созданная для разработки и тестирования этих переключателей, была реализована национальными командами ЕС и РФ

(НИИЭФА). Команда ЕС сосредоточилось на разработке обычного блока коммутации тока с вакуумным выключателем для FDU при использовании промышленных компонентов с более низкими номинальными значениями тока и/или напряжения. Команда РФ разработала новаторскую схему, в которой механический шунтирующий выключатель с бездуговой коммутацией использовался в блоке коммутации тока вместе с тиристорным автоматическим выключателем. Эта конструкция является более сложной, но может обеспечить очень длительный срок службы (10^4 циклов или более), необходимый для коммутирующей сети. Кроме того, команда РФ разработала переключатель быстрого включения, предназначенный для длительного режима повторных замыканий в коммутирующих сетях, и два переключателя с взрывным приводом для резервной защиты: автоматический выключатель и размыкатель.

Все эти переключатели были успешно протестированы при протекании тока до 60 кА и при токах переключения до 66 кА. В настоящее время проводятся дополнительные исследования и разработки с целью оценки рентабельности и демонстрации возможности работы при токе до 75 кА для системы обмотки тороидального поля.

Типичный импульс активной и реактивной мощности, соответствующий сценарию 15 МА индуктивной плазмы при мощности нагрева 73 МВт введенной в момент нарастания тока, показана на рис. 12.8.

Реактивная мощность « Q » из « $Qgrid$ » незначительно меняется во время быстрых (продолжительностью менее 10 с) воздействий по управлению плазмой. Были проведены интенсивные исследования для определения экстремальных условий в случае возможных отказов. Для магнитных катушек одним из наиболее важных параметров является перенапряжение на выводах катушки, которое может привести к пробое изоляции и вызвать цепочку других неисправностей. Результаты анализа аварийных режимов показали, что самый высокий потенциал относительно земли достигается в случае единичного отказа или неисправности

в системе источника питания катушки, при одновременном возникновении короткого замыкания на землю вывода катушки. Значение потенциала – 12,4 кВ в системе тороидального поля и 15,6 кВ – в системах питания модуля центрального соленоида или катушки полоидального поля.

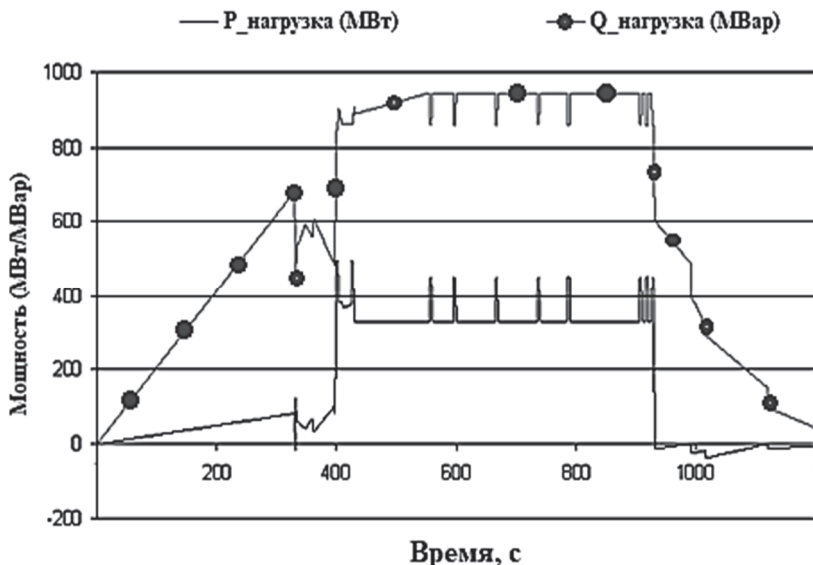


Рис. 11.8. График активной (P) и Реактивной (Q) мощности для тока плазмы 15 МА и 73 МВт дополнительного нагрева

Сеть стационарного электропитания

Сеть стационарного электропитания будет обеспечивать питание от сети переменного тока для всех электрических нагрузок, кроме тех, которые обеспечиваются от сети кратковременного питания (табл. 12.1).

Таблица 12.1

Состав нагрузок сети стационарного электропитания

PBS	Система	Класс IV, кВт	Класс III, кВт	Класс II, кВт	Класс I, кВт	Полная нагрузка, МВт
11	Магниты	0	0	306	0	0,306
18	Питание и кондиционирование стенки	60	0	6	0	0,066
22	Сборка токамака и оснастка/ запчасти	1,810	92	861	0	2,763
23	Устройства удаленного управления	995	0	111	0	1,106
26	Охлаждающая вода	70367	3887	0	0	74,254
27	Тепловая защита	1600	0	0	0	1,600
32	Тритиевый завод и детритизация	3078	4174	170	0	7,422
34	Криогенный завод и криогенное распределение	36,823	951	34	10	37,818
41	Питание обмоток	1414	173	634	0	2,221
41	N&DC PS	28	0	0	0	0,028
45 46 48	Системы контроля, блокировки и аварийного оповещения	0	0	161	0	0,161
51	Ион циклотронный нагрев	2471	0	15	0	2,486
52	Электрон циклотронный нагрев	123	0	0	0	0,123
53	Инжекция нейтральных атомов	60	0	0	0	0,06
62 63	Строения и планировка	21048	682	63	0	21,793
64	Радиологическая защита	0	0	42	0	0,042
65	Распределение газов и жидкостей	272	1087	0	0	1,359
66	Обработка и хранение радио- активных отходов	947	0	0	0	0,947
Всего		141096	11046	2403	10	155

Основными потребителями являются системы водяного и криогенного охлаждения, требующие в совокупности около 72% от общих затрат мощности в 155 МВт. Около 13 МВт (8,7%) необходимо обеспечить даже в случае потери всего внешнего питания. Этот резерв будут создавать дизельные генераторы. Нагрузки, которые не способны выдержать перерыв питания на 30 с, что необходимо для пуска дизельных генераторов, будут питаться от источников бесперебойного питания переменного или постоянного тока. Эта служба, обеспечивающая безопасность и защиту оборудования, будет централизована. Другие источники бесперебойного питания будут децентрализованы в целях оптимизации конструкции.

Сеть стационарного электропитания непрерывно будет получать до 120 МВт от французской национальной сети 400 кВ, управляемой RTE, через два независимых ввода, каждый из которых способен обеспечить максимальную нагрузку всей станции. Мощность сети преобразуется до уровня 22 кВ четырьмя двух обмоточными понижающими трансформаторами, каждый из которых рассчитан на 65 МВА, и распределяется между 8 силовыми шинами класса IV (внутренняя классификация ИТЭР: получение электроэнергии из сети в постоянном режиме), как показано на рис. 12.9.

Аварийное резервное питание обеспечивается четырьмя дизельными генераторами, двумя для обеспечения безопасности и двумя для защиты оборудования, каждый мощностью 3,5 МВА. Эти генераторы подключены к отдельным шинам напряжением 6,6 кВ класса III (переменный ток, протекающий в течении ограниченного времени). Два резервных канала питания нагрузок, связанных с безопасностью, полностью разделены. Это касается не только дизель-генераторов, но и компонентов распределительного устройства, трансформаторов и кабелей. Схема показана на рис. 12.10.

Нагрузки, требующие мощность более 200 кВт, подключаются на напряжении 6,6 кВ с помощью дополнительных понижающих трансформаторов 22 кВ/6,6 кВ и шинопроводов 6,6 кВ класса IV и класса III. К каждой из восьми шин 6,6 кВ подключена конденсаторная батарея для компенсации реактивной мощности, что позволяет повысить коэффициент мощности в нормальном режиме работы до 0,95.

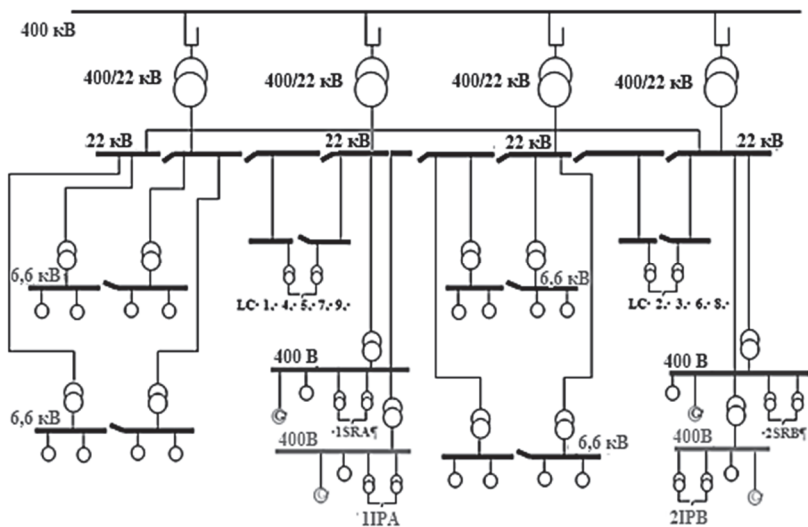


Рис. 12.9. Упрощенная схема сети стационарного электропитания

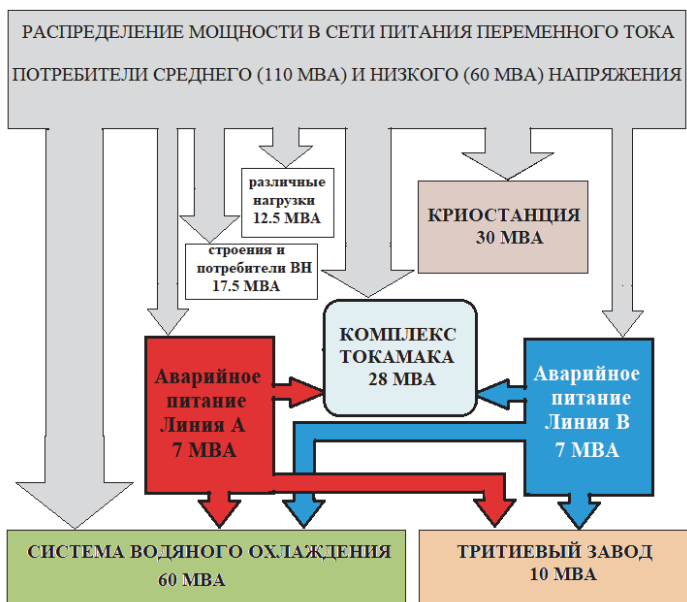


Рис. 12.10. Топология сети стационарного электропитания

Остальные, менее энергоемкие нагрузки, будут подключены к сети 400/230 В, состоящей из 14 трансформаторных подстанций центра нагрузки или центров нагрузки.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите источники, которые используются для питания магнитной системы.

2. Какие типы сетей предполагаются к установке на площадке ИТЭР?

3. Что такое активная и реактивная электрическая мощность? Какие единицы измерения используются для этих величин?

4. На каком напряжении ведется отбор мощности от RTE? Почему?

5. В сетях питания ИТЭР предусмотрено несколько этапов понижения напряжения. Зачем это необходимо и какие машины выполняют эту задачу?

6. Какую мощность потребляет комплекс ИТЭР? Поясните наличие большой реактивной составляющей в этой мощности.

7. Объясните почему в проекте системы электропитания ИТЭР предусмотрены компенсаторы реактивной мощности и фильтры высших гармоник.

8. Перечислите меры, предпринимаемые при аварийном отключении питания систем ИТЭР.

9. Какая функция у блоков быстрой разрядки (FDU)?

10. Почему при потере сверхпроводимости необходимо быстро вывести энергию из обмоток?

11. Сколько энергии необходимо вывести из обмоток при потере ими сверхпроводимости? Куда эта энергия будет перераспределена?

12. Почему выключатель с взрывным приводом не пригоден для многократных коммутаций?

13. К какому классу электроснабжения относится комплекс ИТЭР? Какие меры предпринимаются для обеспечения этого класса?

14. Почему необходимо предусмотреть резервное питание не только от дизельных генераторов, но и от дополнительных резервных источников?

15. Перечислите основных потребителей сети стационарного электропитания.

Список рекомендованной литературы

1. Арцимович, Л.А. Управляемые термоядерные реакции / Л.А. Арцимович. – М.: Физматлит, 1963.
2. Арцимович, Л.А. Физика плазмы для физиков / Л.А. Арцимович, Р.З. Сагдеев. – М.: Атомиздат, 1979.
3. Кадомцев, Б.Б. Коллективные явления в плазме / Б.Б. Кадомцев. – М.: Наука, 1988.
4. Кадомцев, В.Б. Магнитное удержание плазмы / В.Б. Кадомцев, В.Д. Шафранов // Успехи физических наук. –1983. – Март. Т. 139, вып. 3. – С. 399.
5. Мирнов, С.В. Энергия из воды / С.В. Мирнов. – М.: МИФИ, 2008.
6. Мирнов, С.В. Физические процессы в плазме токамаков / С.В. Мирнов. – М.: Атомэнергоиздат, 1983.
7. Основы проектирования магнитного термоядерного реактора / под ред. В.А. Глухих и Г.Л. Саксаганского. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016.
8. Физико-технические проблемы управляемого термоядерного синтеза / под ред. А.В. Дедова. – LAP Lambert Academic Publishing, 2018.
9. Wesson J. "Tokamaks" / J. Wesson. – CLARENDON PRESS- OXFORD, 2004.
10. Miyamoto, K. Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion / K. Miyamoto. – The Third Edition , 2011.

Учебное издание

Дедов Алексей Викторович
Будаев Вячеслав Петрович
Комов Александр Тимофеевич
Ананьев Сергей Станиславович
Жиркин Алексей Владимирович
Захаренков Александр Валентинович
Лазукин Александр Вадимович

СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР

Учебник

Редактор С.В. Казакова
Компьютерная верстка Ю.И. Захаровой

Подписано в печать	10.09.24.	Печать офсетная	Формат 60x90 1/16
Печ. л. 24,25	Тираж 110 экз.	Изд. № 24уК-010	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.