

УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НИИЭФА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ «ПЕРВОЙ СТЕНКИ» РЕАКТОРА ИТЭР

О.Г. Филатов, И.В. Мазуль

В работе затронута проблема экспериментальной имитации наиболее важных эксплуатационных факторов «первой стенки» термоядерного реактора. Особое внимание уделено вопросу создания поверхностных тепловых нагрузок. Обоснован выбор электронно-лучевых установок для имитации квазистационарных тепловых режимов и плазменных ускорителей для имитации режимов срыва плазмы. Приведены основные параметры и используемые методики для электронно-лучевого стенда ЦЕФЕЙ и для плазменного ускорителя ВИКА. Описаны оригинальные методики и аппаратура для проведения комплексных испытаний макетов «первой стенки» в канале ядерного реактора и жидкометаллической тепловой трубы в магнитном поле.

EXPERIMENTAL FACILITIES AT EFREMOV INSTITUTE FOR SIMULATION OF ITER REACTOR PLASMA FACING COMPONENTS OPERATIONAL CONDITIONS. O.G. FILATOV, I.V. MAZUL. The problem of experimental simulation of ITER plasma facing components operational conditions is considered. The main attention is made to creation of surface heat loads. Electron beam facility TSEFEY is constructed for simulation of quasi-stationary heat loads. Plasma accelerator VIKА for simulation of plasma disruption regimes is also described. The main parameters and experimental methods used for both facilities are presented. The experimental techniques for integrated in-pile thermocycling of small first wall mockups are given. The facility to provide testing of liquid metal heat pipe in magnetic field is also described.

ПОТРЕБНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИМИТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ «ПЕРВОЙ СТЕНКИ» ТЯР

Среди повреждающих факторов термоядерных реакторов (ТЯР) наиболее важными считаются: поверхностные тепловые нагрузки, плазменная эрозия и нейтронное облучение. В полной мере воздействие каждого из них в отдельности, а тем более в сочетании друг с другом, реализуется только в токамаке-реакторе. Существующие термоядерные установки не только не воспроизводят нейтронную нагрузку, но имеют, как правило, менее интенсивное (меньше продолжительность и величина нагрузок) тепловое и эрозионное воздействие. Понимание того, что расчетный путь не обеспечивает адекватного описания всех процессов, ответственных за работоспособность конструкции, привело к поиску и созданию специального оборудования и методик, позволяющих имитировать наиболее важные факторы.

Имитацией эрозии материалов, вызванной корпускулярными потоками из плазмы, стали заниматься после появления первых электровакуумных приборов с целью выяснения причин повреждения различных электродов и повышения срока их службы. Наибольшее развитие получили методики с использованием моноэнергетических пучков ионов, полученных с помощью ускорителей. Так, в России на ускорителях ИЛУ (РНЦ «Курчатовский институт»), МАМОНТ (МИФИ) и др. можно определить коэффициент эрозии (ионного распыления) при различных значениях массы, энергии и угла падения частиц, а также материала и температуры мишени. Коэффициент физического распыления в зависимости от этих пяти параметров научились вскоре рассчитывать теоретически.

В 70—80-х годах прошлого века данное направление исследований получило новый импульс благодаря потребностям управляемого термоядерного синтеза, в частности, программе «Токамак» и оформилось в крупное научное направление «Взаимодействие плазмы с поверхностью в установках термоядерного синтеза». В это время глубокому изучению подвергли такие явления, как химическая эрозия, селективное распыление многокомпонентных материалов, изменение структуры поверхности и дозная зависимость распыления, синергетические явления от воздействия смеси частиц и спектра их энергий, пороговые значения распыления при низких энергиях, зависимость химической эрозии от плотности потока частиц, вопросы перепыления и массопереноса и т.д.

В 90-х годах для изучения последних явлений потребовалось создание специальной техники, отличающейся от ускорителей и традиционных типов газового разряда. Наиболее современные устройства PISCES (UCLA, США), ЛЕНТА (РНЦ «Курчатовский институт» РФ), PSI-2 (IPP, Берлин), обеспечивающие имитацию плазменной эрозии, представляют собой сложные многометровые плазменные структуры, находящиеся в магнитном поле и использующие специальные средства нагрева плазмы. Но даже они воспроизводят условия воздействия краевой плазмы токамака на стенку недостаточно полно. По оценкам специалистов PPPL (Принстон), сделанным в 90-х годах в рамках проекта ИТЭР, создание адекватного имитатора краевой плазмы потребует около 30 млн дол., что сравнимо со стоимостью многих токамаков. Это означает, что процесс имитации условий плазменной эрозии вне токамаков достиг своих естественных пределов и новые явления могут быть доступны для изучения лишь при вводе в эксплуатацию такого длинноимпульсного мощного реактора, как ИТЭР. В НИИЭФА для имитации плазменной эрозии материалов соорудили стенд СВИЧ [1], однако работы на нем вскоре были заморожены из-за высокой конкуренции по теме и смены приоритетов в пользу имитации тепловых нагрузок.

Решению проблемы имитации нейтронного воздействия в ТЯР помогло существование в рамках ядерного реакторостроения подобной темы, получившей свое развитие раньше, чем это стало актуально для УТС. Для имитации нейтронного воздействия на материалы и компоненты ядерных реакторов создали ряд экспериментальных реакторов (BOR-60, CM-2, РБТ-6, ИР-8 и др.) и разработали многочисленные методики изучения радиационных эффектов как в процессе облучения, так и после него. Для исследования влияния нейтронного облучения, как правило, стандартизованные образцы кандидатных материалов и их соединений выдерживались в экспериментальных ядерных реакторах при определенных значениях температуры облучения и флюенса. Затем образцы перемещали в горячие камеры, где с помощью дистанционных средств подвергали комплексу традиционных физико-механических исследований. В экспериментально-методическом плане, в отличие от ситуации с плазменной эрозией, запросы термоядерного сообщества мало что изменили. Попытки разработать мощный источник нейтронов с энергией 14 МэВ, характерных для термоядерного реактора и обладающих отличным от ядерных нейтронов повреждающим эффектом, ограничиваются проектными работами и НИР, далекими пока от практической реализации. На этом фоне интересным методическим продвижением вперед представляется методика ресурсных комплексных внутрореакторных испытаний, рассмотренных ниже. В целом, как и в случае с

плазменной эрозией, разработчики энергонапряженных компонентов реактора использовали богатый методический опыт и устройства своих коллег по ядерному реакторостроению.

В вопросе имитации поверхностных тепловых нагрузок, характерных для ТЯР, значительных наработок в других отраслях техники, которые бы составили необходимую базу, обнаружено не было. Если говорить об имитации квазистационарных тепловых нагрузок, реализуемых в нормальных режимах токамака ИТЭР, то практический интерес представляют стационарные (с возможностью циклирования) тепловые потоки от 0,1 до 1000 МВт/м² с зоной нагружения от 1 до 10⁴ см², поверхностным характером тепловыделения и общей мощностью от 10 до 500 кВт. Подобные нагрузки характерны для лазерных зеркал, электродов мощных электровакуумных устройств, сопел и обтекателей ракетно-космической техники, мишеней мощных ускорителей заряженных частиц различного назначения и т.п. В ракетно-космической технике для имитации тепловых режимов использовались, по-видимому, главным образом, «огневые» испытания, использующие тепло химических реакций и поэтому непригодные для вакуумных условий, необходимых в нашем случае. Электроды мощных электровакуумных приборов, по-видимому, проходили испытания на макетах самих приборов, поскольку создание специальных имитаторов требует больших средств, чем создание собственно прибора или его макета. При изготовлении лазерных зеркал также, по-видимому, использование соответствующего этому зеркалу лазера или его модели было значительно проще и дешевле, чем создание специального имитатора тепла. В мощных ускорителях характер тепловыделения от высокоэнергетичных электронов или ионов, как правило, не является поверхностным и составляет от 1 мм (протоны, 10 МэВ) до нескольких сантиметров, поэтому используемые там методы малопригодны для нас.

В следующем разделе будет обоснован выбор в пользу ускорителей электронов средних энергий (20—100 кэВ). На момент начала создания собственного имитатора (1990 г.) были рассмотрены возможности трех ускорителей электронов различного назначения: ЕМО-60-3 (20 кВ, 3А) во ВНИИНМ, стенда СТИ (60 кВ, 1 А) в НПО «Композит» и электронного ускорителя (100 кВ, 100 мА) в НИИ тепловых процессов. Опыт использования этих ускорителей в период 1989—1994 гг. [2, 3] подтвердил возможность их применения для имитации тепловых нагрузок ТЯР, однако выявил ряд существенных недостатков: ограниченная доступность для проведения работ по нашей теме, а также (в разной мере в зависимости от ускорителя) низкая общая мощность в пучке, отсутствие или недостаток средств контроля величины и однородности теплового потока и температуры поверхности, невысокие параметры контура водяного охлаждения, ограниченные возможности управления временными (датчик продолжительности импульса и скважности) и пространственными характеристиками пучка/растра, в том числе высокочастотного (>1 кГц) сканирования, недоступность работы со специальными материалами (бериллий, жидкие металлы).

Таким образом, создание специального имитатора квазистационарных поверхностных тепловых нагрузок, характерных для ТЯР, стало одним из важнейших пунктов программы разработки энергонапряженных компонентов, и было в основном завершено в 1994 г. (стенд ЦЕФЕЙ в НИИЭФА). Параллельно в эти же годы

похожие имитаторы (табл. 1) были созданы в США (EBTS [4]), Германии (JUDITH [5]), Японии (JEBIS, [6]), Франции (FE 200, [7]). Американский стенд вступил в эксплуатацию раньше других, остальные стенды, включая ЦЕФЕЙ, заработали практически одновременно в период с 1993 по 1995 г.

Т а б л и ц а 1. Электронно-лучевые установки для имитации тепловых нагрузок

| Название, местоположение | Общая мощность, кВт | Энергия электронов, кэВ | Размер рас-тра, мм | Основные достоинства |
|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|--|
| JUDITH, FZJ, Юлих, Германия | 60 | 150 | 200×200 | Совместим с Ве и облученными материалами, имитирует VDE |
| FE-200, Framatome, Ле-Крезот, Франция | 200 | 200 | 1000×300 | Высокая мощность, большие макеты, отличная водяная петля |
| JEBIS, JAERI, Нака, Япония | 200 (400) | 100 | 500×300 | Высокая мощность, имитирует VDE |
| OHVIB, JAERI, Ораки, Япония | 50 | 30 | 100×100 | Совместим с Ве и облученными материалами |
| ЦЕФЕЙ, НИИЭФА, С.-Петербург, Россия | 60 (80) | 30 | 800×300 | Совместим с Ве и жидкими металлами, большие макеты |
| EBTS, SNLA, Альбукерк, США | 30 | 30 | 200×200 | Совместим с Ве, отличная водяная и гелиевая петли |
| EB-1200, SNLA, Альбукерк, США | 1200 | 40 | 1000×500 | Наивысшая мощность, большие макеты, совместим с Ве |

Правильность и своевременность решения о создании специализированного имитатора ЦЕФЕЙ подтверждаются также дальнейшим развитием этой техники. В последние 5—6 лет дополнительно были введены в эксплуатацию более современные стенды EB-1200 (SNLA) и стенд OHVIB (JAERI), начато строительство стендов NBI (Garching) и JUDITH-2 (Julich) в Германии. Модернизация стенда ЦЕФЕЙ, начатая в 2002 г. с целью улучшения его параметров, находится в единой цепи описанных событий.

Помимо квазистационарных тепловых нагрузок в номинальных режимах работы токамака большое значение имеют чрезвычайно высокие импульсные тепловые нагрузки, попадающие на стенки при таких переходных плазменных процессах, как срывы плазмы, ELM, вертикальные смещения плазмы (VDE) и др. Поиски имитаторов нагрузок такого типа показали, что созданные в рамках различных направлений программы УТС плазменные ускорители нескольких типов удачно соответствуют требуемым параметрам. Более того, все они сооружены в России, на Украине и зарубежных аналогов не имеют. Очень важным является также вопрос о возможном синергизме воздействия нескольких упомянутых повреждающих факторов ТЯР. По мере развития методов имитации этих факторов данному вопросу уделялось постоянное внимание.

ИМИТАЦИЯ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Выбор источника тепла. Выбор способа теплового нагружения не является случайным и основан на анализе различных вариантов с учетом адекватности усло-

виям ТЯР, а также удобства и стоимости подготовки и проведения экспериментов. Были проанализированы следующие источники теплового нагружения:

- ускоренные пучки ионов и нейтралов;
- высокочастотный нагрев;
- лучистый нагрев;
- нагрев теплопроводностью от дополнительного нагревателя;
- плазмотрон;
- газовый разряд;
- электронно-лучевой нагрев.

Нагрев с помощью мощных ионных или нейтральных пучков позволяет получить высокую (~ 10 МВт/м²) тепловую нагрузку на значительной (~ 1 м²) площади с поверхностным характером тепловыделения (пробег в графите $\sim 10^{-6}$ м для дейтерия с энергией ~ 100 кэВ). Однако имеющийся опыт эксплуатации подобных ускорителей (например, инжекторов нейтралов, используемых на токамаках) говорит о том, что стоимость планируемых экспериментов будет чрезвычайно высокой.

Высокочастотный нагрев также обеспечивает поверхностное выделение тепла (толщина скин-слоя в графите менее 100 мкм при частоте более 1 ГГц), но метод очень чувствителен к состоянию поверхности. При наличии на ней дефектов становится невозможным получить контролируемый равномерный нагрев. К тому же под каждый своеобразный по форме объект нагружения придется изготавливать индивидуальную антенну.

Лучистый нагрев от горячего излучателя (без фокусировки) не позволяет получить нагрузку выше 2—3 МВт/м². Использование мощных, например, СО₂-лазеров позволяет получать более высокие нагрузки в небольшом пятне, но является очень дорогостоящим занятием. К тому же встает проблема ввода излучения в вакуум, в котором необходимо испытывать материалы.

Мощные плазмотроны, работающие на водороде или гелии, обеспечивают значительные тепловые нагрузки, но их применение связано с большими затратами и не позволяет получить вакуумные условия у поверхности материалов.

Нагреть поверхность дополнительным нагревателем посредством теплопроводящего слоя можно двумя способами. Первый предполагает плотный контакт нагревателя (например, резистивной вставки из тугоплавкого материала) с поверхностью испытываемого образца. Таким образом, через мягкую графитовую прослойку удастся передать высокие тепловые нагрузки (до 30—40 МВт/м²) [8]. При этом условия на поверхности (взаимодействие с материалом прокладки, неоднородность теплопередачи из-за деформации образца при нагреве и т.п.) нельзя считать вполне адекватными. Передача тепла вторым способом осуществляется через газ (например, диссоциированный водород или гелий, $P \sim 1000$ Па), циркулирующий в узком зазоре (≤ 1 мм) между нагревателем и образцом [9]. Согласно такой схеме, вероятно, возможно реализовать тепловую нагрузку максимум до 10 МВт/м². Обеспечение равномерного зазора в процессе испытаний представляется также очень сложным.

Наиболее естественным способом адекватной имитации тепловых потоков, характерных для ТЯР, представляется применение плазменных устройств. Однако

многочисленные попытки создать адекватный диверторной плазме имитатор нигде в мире успеха не имели. Простейшие типы газовых разрядов не обеспечивают необходимых параметров теплового и корпускулярного нагружения. Более сложные плазменные устройства, использующие сильные магнитные поля, катоды из специальных материалов, дополнительные средства для нагрева плазмы (электронные пучки, ВЧ-устройства), дают более адекватные нагрузки, но по своей сложности и стоимости начинают приближаться к токамаку.

В конечном счете, в качестве основного инструмента имитации поверхностной тепловой нагрузки были выбраны электронные пучки. Устройства, генерирующие пучки необходимой плотности потока энергии ($1\text{--}500\text{ МВт/м}^2$), хорошо отработаны на электронно-лучевых сварочных и плавильных установках. Небольшая глубина проникновения в твердое тело электронного пучка средних энергий ($10\text{--}100\text{ кэВ}$) при имитации основных режимов дивертора (за исключением режима срыва плазмы) позволяет рассматривать тепловое воздействие пучка как поверхностное. На рис. 1 показаны расчетные глубины распространения/выделения тепла для электронов (в зависимости от их энергии) и для идеальной поверхностной нагрузки (в зависимости от времени с момента нагружения). Хорошо видно, что в интересующем нас временном диапазоне глубина выделения тепла при торможении электронов существенно меньше глубины распространения фронта тепловой волны от поверхности. Там же для сравнения приведены данные по другим источникам тепла [10].

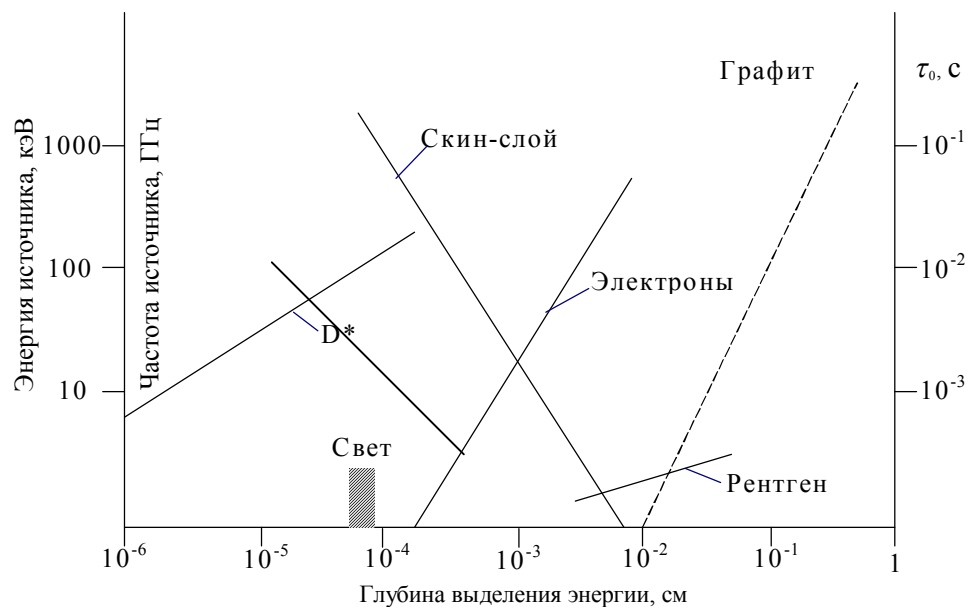


Рис. 1. Глубина выделения энергии в графите для различных методов нагрева в зависимости от энергии/частоты источника (—), а также глубина диффузионного прогрева в зависимости от времени (---)

При выборе параметров электронного ускорителя рассматриваются две технические возможности: электронные пучки сварочного и плавильного типа. Устройства первого типа работают, как правило, при относительно высоких энергиях ($60\text{--}150\text{ кэВ}$) и слаботочных тонких пучках ($< 1\text{ А}$, диаметр $\sim 1\text{ мм}$), что вызвано необходимостью обеспечивать глубокое проплавление узкого слоя металла при

сварке. Достоинством таких пучков при имитации тепловых нагрузок ТЯР являются максимально достижимые в стационаре плотности потока тепла ($>1000 \text{ ГВт/м}^2$), позволяющие имитировать все возможные на «первой стенке» режимы, включая касательное падение тепла и потерю отдельной облицовочной плитки. Высокая геометрическая эффективность использования пучка и отсутствие необходимости использования масок при его сканировании в случаях облучения полной поверхности мишени также являются достоинствами сварочных пушек. Между тем точечный характер нагрузки, обуславливающий вышеупомянутые достоинства, вызывает ряд недостатков: повышенные требования к частоте сканирования пучка при облучении больших площадей с целью снижения микротермоциклирования поверхности, опасность глубокого проплавления и разрушения мишени при аварийной потере раstra, относительно высокий уровень рентгеновского излучения и более глубокий пробег электронов. Очевидно, что для плавильных пушек с низкой энергией электронов (20—30 кэВ) и относительно «толстым» пучком ($D = 15\text{—}30 \text{ мм}$) ситуация с достоинствами и недостатками зеркально противоположная.

Стенд ЦЕФЕЙ в настоящее время использует электронную пушку плавильного типа. Проводимая модернизация стенда, предполагающая увеличение энергии до 70 кВ при сохранении тока пучка до 3 А с целью повышения общей мощности установки до 200 кВт, что важно при испытании крупномасштабных компонент, является попыткой компромисса между плавильными и сварочными установками. При напряжении 70 кВ и малом токе ($< 1 \text{ А}$) существует возможность получения узкого «тонкого» пучка и высокой плотности потока тепла ($\sim 1 \text{ ГВт/м}^2$). В то же время при максимальном токе и пониженной энергии ($< 40 \text{ кэВ}$) пучок будет сохранять достоинства плавильной установки.

Описание стенда ЦЕФЕЙ. Основные параметры стенда ЦЕФЕЙ:

| | |
|---|-----------|
| Энергия электронов, кэВ ... | 20—30 |
| Ток пучка, А ... | ≤ 3 |
| Мощность пучка (макс.), кВт ... | 60 (80) |
| Частота сканир. (строчная) пучка, кГц ... | 1 |
| Диаметр пучка, мм ... | 20 |
| Максимальная плотность мощности, МВт/м ² ... | 50—100 |
| Максимальный размер раstra, мм ... | 500×500 |
| Размер камеры, мм: | |
| высота ... | 1800 |
| диаметр ... | 1500 |
| Скорость откачки, л/с ... | 15 000 |
| Остаточное давление, Па ... | 10^{-5} |
| Параметры охлаждения на мишени: | |
| Скорость откачки, л/с ... | 3 |
| Давление, МПа ... | 2 |

Стенд ЦЕФЕЙ [11] (рис. 2) состоит из следующих основных систем: источника тепловой нагрузки, мишенного устройства, вакуумной системы, систем измерения параметров пучка, системы диагностики мишеней, системы охлаждения, специальных систем.

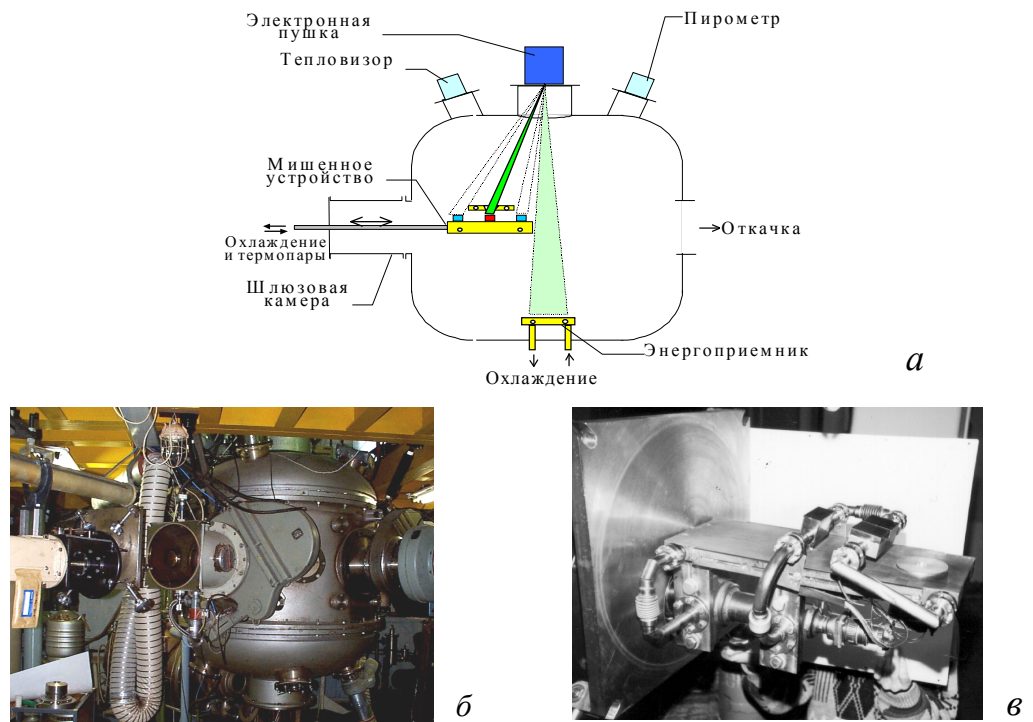


Рис. 2. Стенд ЦЕФЕЙ: *а* — схема установки; *б* — внешний вид; *в* — мишенный узел

Источник тепловой нагрузки состоит из электронной пушки, системы ее высоковольтного питания и системы управления пучком (временная и пространственная развертка). Электронная пушка плавильного типа разработки ВЭИ (г. Истра), имеющая вольфрамовый дисковый катод со сферической вогнутой поверхностью и косвенным накалом, позволяет получать максимальный ток 3 А и подавать максимальное напряжение 35 кВ. Система высоковольтного питания накладывает определенные ограничения по мощности таким образом, что произведение тока на напряжение в упомянутых пределах не должно превышать 60 кВт в стационаре или 80 кВт кратковременно (<10 мин). Оптика Пирса и аксиальная магнитная линза обеспечивают эффективную проводку пучка в мишенную камеру, фокусное расстояние составляет 400 мм. Мишенное устройство находится на удалении 900 мм. Квадрупольная магнитная линза на выходе из источника позволяет осуществить отклонение пучка вдоль двух взаимно перпендикулярных осей с частотой 1000 Гц, обеспечивая режим сканирования пучка по площади. Система управления разверткой обеспечивает растр телевизионного типа. Предельный угол отклонения пучка составляет 25°, таким образом, в зоне мишени обеспечивается максимальное поле развертки 500×500 мм. Временной профиль электронной нагрузки на мишень формируется перемещением пучка между мишенью и энергоприемником, расположенным на дне вакуумной камеры. Соотношение времен пребывания на мишени или энергоприемнике может быть любым, а скорость формирования нагрузки определяется временем перемещения между ними, которое составляет ~ 10 мс.

Мишенное устройство стенда расположено в экваториальной плоскости большой камеры на подвижном манипуляторе, смонтированном на одном из боковых

фланцев. Герметичный шлюз позволяет в течение 15 мин обслуживать мишень (замена образцов, фотографирование и т.п.) на любом этапе эксперимента без выключения пушки и потери вакуума в основной камере. Мишенный столик может выдвигаться вплоть до вертикальной оси камеры, обеспечен подачей воды, снабжен пучком термодар (16 каналов) и выдерживает максимальную нагрузку до 20 кг. Максимальные габариты образцов/макетов, испытываемых с помощью шлюзования, определяются габаритами цилиндрической шлюзовой камеры ($\varnothing = 280$ мм, $L = 250$ мм). Для формирования поля облучения с резкими границами и для защиты термодар используется набор сменных охлаждаемых масок-коллиматоров различной конфигурации, которые также размещаются на мишенном столике.

Вакуумная система стенда построена вокруг основной мишенной камеры ($\varnothing = 1500$ мм, $h = 1800$ мм). Шлюзовая камера, электронная пушка и основной насос для удобства эксплуатации присоединены к мишенной камере с помощью шиберных затворов. Электронная пушка имеет собственную откачку, осуществляемую постом на базе турбомолекулярного насоса. Основной насос (разработки ЦКБМ) также является турбомолекулярным и имеет уникальную в мире производительность, равную 15 000 л/с. Шлюзовую камеру откачивают байпасной форвакуумной линией. В мишенной камере без прогрева в течение 1—2 сут после разгерметизации достигается фоновое давление $\sim 10^{-5}$ Па, в режиме максимальной мощности пучка (60 кВт) давление удерживается на уровне 10^{-3} Па. В экваториальной плоскости мишенной камеры расположены два крупных прямоугольных фланца (800×800 мм), обеспечивающих возможность установки для испытаний крупногабаритных макетов, которые не уместятся на мишенном столике и не пройдут сквозь шлюзовое устройство. После использования этих фланцев первый пучок малой мощности можно получить уже через 3—4 ч.

Система измерения параметров пучка (общей мощности, плотности мощности и равномерности пучка в поле облучения), в конечном счете, после проб и ошибок была построена на теплотрии, а не на электротрии. Общая мощность при квазистационарных нагрузках в режиме активного охлаждения макетов измеряется с помощью водной калориметрии. Для этого на входном и выходном патрубках охлаждаемого макета располагаются измерительные вставки с набором термодар, погруженных в струю хладагента в различных точках ее сечения. Показания 3—5 термодар в каждом входном и выходном сечении усредняются, что обеспечивает определение истинной входной и выходной температуры воды. Измеряя расход воды через макет, мы можем получить мощность, выносимую водой и, следовательно, поглощаемую поверхностью макета при электронной бомбардировке. При четкой фиксации границ поля облучения с помощью масок мы знаем площадь облучения и, следовательно, усредненную плотность потока тепла. Как правило, требуется равномерное пространственное нагружение. Контроль однородности осуществляется одним из следующих способов:

— перемещением по полю облучения точечного или многоточечного калориметра аккумуляционного типа ($Q = Cm\Delta T$), работающего в режимах коротких импульсов нагружения ($< 1—3$ с);

— перемещением в поле облучения активно охлаждаемого термодарного измерителя градиентного типа, который имеет известное расстояние между термодара-

ми, расположенными в материале с известной теплопроводностью в ряд вдоль направления градиента температур;

— размещением в поле облучения графитовой «шоколадки», облучаемой в импульсном режиме, с одновременным контролем температуры поверхности каждой «дольки» с помощью инфракрасной камеры (тепловизора);

— осциллографическим контролем равномерности строк на генераторе раз-
вертки.

Первый из вариантов можно применять и для определения абсолютных значений потока в импульсных режимах нагружения, когда методы, рассчитанные на стационарный режим (водная калориметрия, градиентный измеритель и т.п.), не работают.

В режимах, не требующих высокой точности измерений, используют также электрометрические данные о токе и энергии электронов в пучке. Однако для пересчета в поглощенную мощность необходимо учитывать коэффициенты отражения мощности электронного пучка в зависимости от материала мишени, а также от угла падения. Для этого привлекаются литературные данные о коэффициентах отражения электронных пучков с энергией 20—30 кэВ. К примеру, коэффициент отражения на графите составляет 5—10%, а на вольфраме — 30—40%. Если используется новый материал мишени, его коэффициент отражения получают в результате серии импульсных нагружений калориметров аккумуляционного типа, изготовленных из данного материала и имеющих различную геометрию (плоский, типа цилиндра Фарадея и т.д.).

Система диагностики мишеней предназначена для контроля состояния объекта испытаний как в процессе облучения, так и в паузах. Объемные температуры измеряют термопарами различного типа, а также с помощью отработанной методики их фиксации в различных материалах. Для определения температуры поверхности применяют импульсные точечные пирометры и инфракрасные камеры, позволяющие регистрировать пространственное поле температуры поверхности в диапазоне от 100 до 1700 °С со скоростью от 30 до 3 кадров в секунду. Визуальный контроль мишеней осуществляется также видеокамерой, а детальный (в том числе с использованием оптики) осмотр макетов в паузах между импульсами проводится в шлюзовой камере. Запись и обсчет всех показаний осуществляются с помощью персонального компьютера.

Система охлаждения стенда состоит из нескольких подсистем. Охлаждаются все системы стенда, кроме мишенной, сетевой водой. На случай отключения сети предусмотрена локальная сеть малого давления (<5 атм), состоящая из небольшого накопителя и гидронасоса. Для охлаждения мишенного устройства имеется полузамкнутая петля, в которую включены: циркуляционный насос ($P_{\max} = 2,3$ МПа, $T_{\max} = 90$ °С, $Q = 3$ л/с), накопительный бак, измерители давления и расхода. При непродолжительных имитациях петля работает как замкнутая, при длительных — нагретая вода в накопителе заменяется сетевой. Модернизация стенда с учетом высокой мощности пучка (200 кВт) предусматривает построение полностью замкнутой петли для всего стенда с использованием градирни. Кроме того, начато строительство уникальной гелиевой петли с максимальными параметрами: $P_{\max} = 15$ МПа, $T_{\max} = 700$ °С, $Q_{\max} = 600$ г/с.

Специальные системы стенда предусмотрены для работ с объектами повышенной опасности, в частности с бериллием. Стенд снабжен спецвентиляцией, обеспечивающей отсос и фильтрацию бериллиевой пыли при очистке мишенной камеры в случае аварийного распыления бериллия. К нормальным относятся режимы работы с мишенями из бериллия, температура которых не выше 700 °С. Чтобы не допустить их перегрев, предусмотрена аварийная блокировка пучка, настроенная с помощью направленного на мишень пирометра. Стенд расположен в специально подготовленном помещении, в соседнем же находятся жидкометаллические Na—K-петли, что позволяет при необходимости организовать работы с мишенями, охлаждаемыми жидким металлом.

Уникальные возможности стенда, спроектированного для проведения работ по «первой стенке», обеспечили его высокую востребованность. Так, в период с 1994 по 2003 г., несмотря на кризис научных исследований в целом в России, стенд эксплуатировался в среднем не менее 500 ч в год. Параметры его основных систем и методическое обеспечение позволили включить его в планы международного разделения труда, в частности, по проекту ИТЭР. Соответствие диагностических возможностей стенда международному уровню подтвердили результаты контрольных сравнительных экспериментов в исполнении нескольких независимых экспертов, проведенных в 1998 [12] и 2003 гг.

Классификация и методики проводимых экспериментов/испытаний. На стенде проводятся разнообразные эксперименты, характеризующиеся своими методическими особенностями. Мы сделали попытку провести некоторую классификацию этих экспериментов как с целью продемонстрировать возможности созданного стенда, так и для упорядочения сложившейся в процессе работ терминологии по нашей теме.

По отраслям знаний проводимые эксперименты можно условно разделить на следующие: материаловедение, взаимодействие пучков с твердым телом, термомеханика, теплофизика и гидродинамика, электрофизика.

В числе материаловедческих экспериментов можно назвать сравнительное изучение термостойкости и тепловой эрозии различных углеродистых материалов под воздействием электронной (тепловой) нагрузки в зависимости от структуры, химического состава, ориентации к пучку и других параметров материала [13]. Другой пример — использование нагрева пучком сплавов меди выше температуры начала фазовых превращений при имитации вариантов пайки для изучения деградации таких свойств, как прочность, теплопроводность и др. При проведении материаловедческих экспериментов используются диагностические (электрофизические) возможности стенда для регистрации параметров теплового нагружения (величина тепловой нагрузки, продолжительность и число импульсов, кинетика температуры образца и т.д.). Арсенал же истинно материаловедческих исследований (оптическая и электронная микроскопия, элементный и фазовый анализ, изучение микротвердости, физико-механических характеристик материала и др.) в таких экспериментах используется после извлечения образцов со стенда.

Примером исследования взаимодействия пучков с твердым телом может служить эксперимент по определению коэффициентов отражения мощности электронов от различных тел, упомянутый выше. В этом эксперименте применяются элек-

трофизические (электрометрия) и теплофизические (калориметрия) методы измерений.

К электрофизическим экспериментам относятся попытки добиться предельных параметров эксплуатации электронной пушки, таких, как использование газовой фокусировки пучка на остаточном газе или в парах интенсивно испаряемой мишени для получения максимальной плотности потока тепла ($> 100 \text{ МВт/м}^2$). Другой пример связан с оптимизацией раstra электронного пучка для обеспечения его необходимой однородности и коэффициента полезного использования тока.

В силу сложившегося разделения труда между различными организациями традиционные теплогидравлические эксперименты на стенде фактически не проводились, хотя возможность для этого есть. На основе экспериментальных данных коллег из других групп выбирали соответствующие параметры теплоносителя (вода), обеспечивающие, как правило, режим однофазного конвективного теплообмена с сильно недогретой жидкостью, поддающиеся расчету коэффициенты теплообмена и отсутствие кризиса теплообмена. Тем не менее, такие эксперименты, как периодическая калибровка тепловизора в зависимости от состояния поверхности материала (изменение шероховатости, рост углеводородных пленок и т.п.), означают наработку экспериментального банка данных по коэффициентам черноты различных материалов для различных условий эксплуатации. Другой пример теплофизического эксперимента — изучение контактных тепловых сопротивлений на границе твердого тела и жидкого металла (Ga—W, Ga—графит, Ga—Cu), а также двух твердых тел в зависимости от силы прижима, шероховатости и т.п. — измерения с целью отработки конструкции легко заменяемой облицовки теплоаккумулирующего типа для «первой стенки» [14]. Методическую основу этих экспериментов составляет определение температур с помощью термопар, пирометра и тепловизора.

Основное содержание работ на стенде — эксперименты по термомеханике. В них внимание исследователя сосредоточено на регистрации момента, характера и степени механических повреждений элементов конструкции или материалов. В процессе эксперимента в камере можно проводить визуальный контроль, регистрацию образующихся течей теплоносителя или пробного газа (He) в вакуум, изменений теплового режима (перегрев из-за растрескивания) и др. После извлечения мишеней возможны металлографический анализ, измерение деформаций, механические испытания вырезанных из мишени участков-свидетелей [15, 16].

По характеру проводимых исследований можно условно выделить группы экспериментов: фундаментальные, оптимизационные, поисковые, технологические, ресурсные, сравнительные, имитационно-методические.

Специальные эксперименты по изучению фундаментальных явлений в связи с программой разработки «первой стенки» на стенде ЦЕФЕЙ не планировались. Однако, решая некоторые методические, диагностические задачи, исследователи вынуждены были изучать в новых специфических условиях некоторые константы (степень черноты, коэффициент отражения электронов), которые носят фундаментальный характер и представляют долгосрочный интерес.

Примером экспериментов оптимизационного типа может служить комплекс испытаний макетов, различающихся геометрией и размером облицовочных плиток [17]. Варьируя геометрию и габариты облицовочных плиток при согласовании с

расчетными предсказаниями и технологическими соображениями, в эксперименте удается выявить оптимальные параметры облицовки для различных случаев. Под поисковым экспериментом мы понимаем работу по проверке осуществимости в принципе того или иного подхода к решению проблемы.

Технологические эксперименты работы на стенде получили широкое распространение. Помимо отработки таких технологий, как вакуумная наплавка и скоростная пайка с помощью электронного пучка, можно выполнять следующие представляющие интерес по теме операции: электронно-лучевую сварку, термообработку материалов и соединений, нанесение покрытий путем испарения и конденсации (термопокрытия, ассистированные плазменной бомбардировкой), диффузионную сварку и др.

Ресурсные испытания, как правило, предполагают имитацию повреждающих факторов (в нашем случае тепловой нагрузки) в режимах времени, близких проектным. В нашем случае для различных компонентов «первой стенки» время эксплуатации колеблется от 300 до 3000 ч, а число импульсов — от 300 до $3 \cdot 10^4$ циклов. С учетом высокой стоимости работ на стенде практически достижима лишь нижняя граница указанных диапазонов. Поэтому на вооружение были взяты два альтернативных подхода: проведение ускоренных термоциклических испытаний и разработка более дешевого способа имитаций поверхностных нагрузок.

Примером сравнительных экспериментов может служить изучение термостойкости различных способов соединения бериллия с медью (более 10 вариантов) [15]. При этом основное внимание уделяется не абсолютному значению повреждающего фактора (достаточно некоторого приближения к требуемому значению) и не конечному наблюдаемому результату, а идентичности условий нагружения для всех испытываемых материалов. В итоге можно получить рейтинговую (не всегда количественную) сравнительную оценку стойкости исследуемых объектов.

Имитационно-методическими мы условно назвали те эксперименты, в которых на первый план выходят трудности имитации требуемых условий нагружения и больше внимания уделяется адекватности используемых методов реальным условиям эксплуатации. Имитация аварийных режимов эксплуатации «первой стенки» в случае потери теплоносителя или остановки хладагента, а также потери одной из облицовочных плиток требует проведения специальных экспериментов. В случае проблем с хладагентом нагружение макета производится вплоть до момента его расплавления и выхода воды в мишенную камеру, что требует особых процедур обращения с электронной пушкой. Для имитации же режима потери одной из плиток требуется режим повышенной тепловой нагрузки ($>100 \text{ МВт/м}^2$), получение которого на современном ЦЕФЕе требует специальных мер: сокращения расстояния от пушки до макета с 0,9 до 0,4 м, отработка режимов газовой фокусировки и т.п.

Примером особого внимания к адекватности имитации служит отработка режимов сканирования пучка для обеспечения равномерного нагружения больших площадей. Методом численного эксперимента для различных параметров пучка анализируется равномерность поля облучения и амплитуда паразитных термоциклов, связанных со сканированием. На рис. 3 приведены результаты численного эксперимента, выполненного по заказу авторов М. Румянцевым: схема сканирования электронным пучком, плотность тока в котором распределена по Гауссу (R —

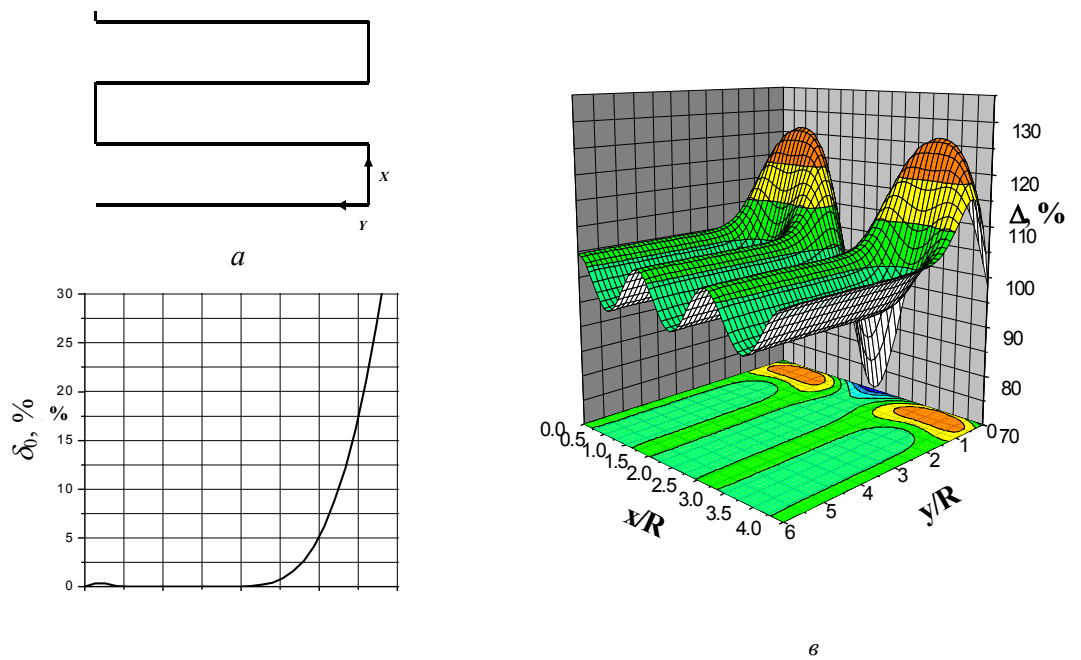


Рис. 3. Неоднородность плотности теплового нагружения в растре: *a* — схема сканирования пучка; *б* — неоднородность растра вдоль координаты, перпендикулярной строке; *в* — трехмерное распределение нагрузки в растре

радиус пучка, d — расстояние между строк), и распределение интегральной (усредненной) нагрузки поперек строк и вблизи края растра. Видно, что неоднородность не превышает $\pm 5\%$ от среднего значения, если расстояние между строк не больше $d \leq 1,625 R$, а в зоне поворота пучка неоднородность может достигать 30% (при $d = 1,625 R$). Однако на расстоянии от края $y > 1,5 R$ эта краевая неоднородность исчезает.

Помимо значений неоднородности растра необходимо оценить амплитуды термокачки на поверхности макета в зависимости от параметров сканирования пучка. На рис. 4 приведена оценка этих термокачек для макета размером $10 \times 20 = 200 \text{ см}^2$ (общая мощность пучка 200 кВт, скорость движения пучка $V = 2000 \text{ м/с}$, диаметр пучка 10 мм), имеющего охлаждаемую водой стенку толщиной 3 мм. Видно, что амплитуда термоциклов на поверхности макетов меняется от $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (при $d/R = 1,625$) до $157 \text{ }^\circ\text{C}$ (при $d/R = 0,1$), что составляет от 12 до 55% от значения средней температуры поверхности (см. огибающую с белыми квадратиками), которая достигается при идеально однородном распределении 200 кВт по площади всего макета без сканирования. Из распределения температуры по толщине стенки в режиме сканирования для одного из вариантов видно, что значительное термоциклирование, связанное с прохождением пучка, заметно только в приповерхностном слое толщиной менее 0,5 мм.

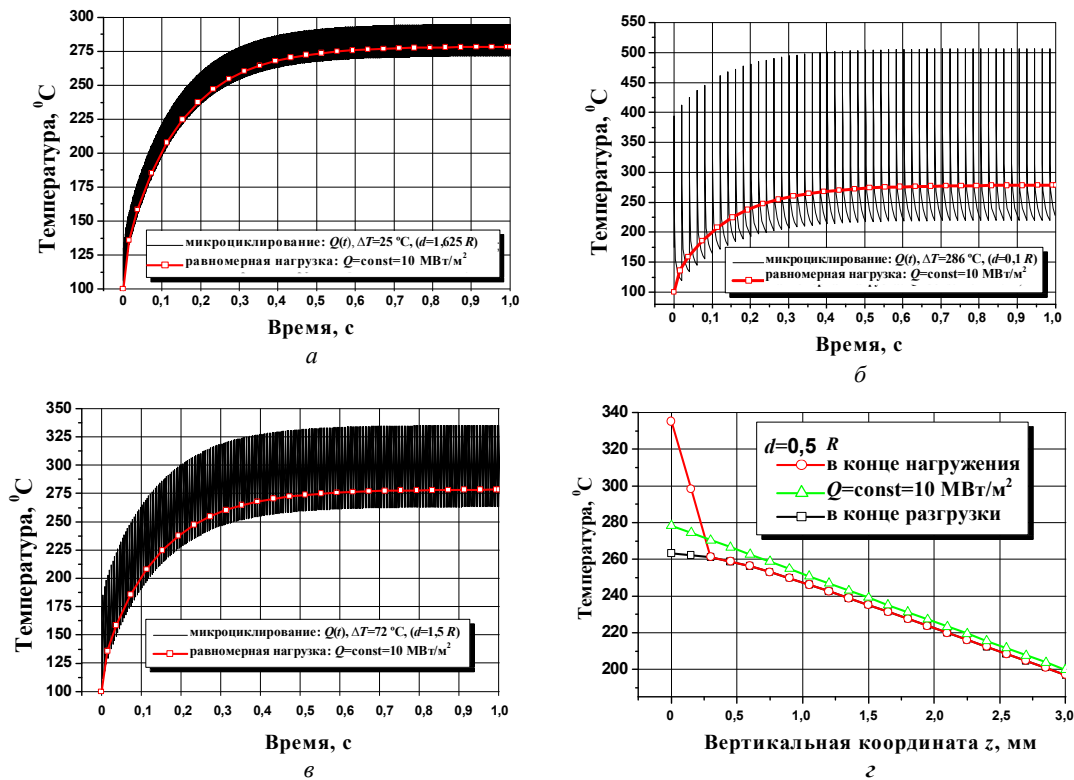


Рис. 4. Параметры дополнительного микроциклирования при сканировании пучка: $R = 5$ мм; $Q = 200$ кВт; размер раstra 20×10 см; a , b , $в$ — кинетика температуры на поверхности макета при $d = 1,625$, $0,1$ и $0,5 R$ соответственно; $г$ — зависимость температуры от вертикальной координаты ($z = 0$, поверхность нагружения)

Требуемая однородность поля облучения в зависимости от решаемой задачи определяется выбором соотношения d/R . Хорошие результаты (неоднородность менее 5%) в широком диапазоне его значений ($0—1,625$) обеспечиваются выносом зоны поворота пучка на расстояние $y > 0,5—1,5 R$ (в зависимости от d/R) за края макета.

Приведенные результаты численного эксперимента позволяют продемонстрировать процедуру выбора оптимального режима облучения макета в режиме сканирования пучка. Для исключения влияния паразитного (связанного с конечной скоростью сканирования пучка) термоциклирования принимаются во внимание следующие обстоятельства:

- если термомеханическим испытаниям подвергается зона соединения облицовки с подложкой, то, как видно на рис. 4, $г$, микроциклирование от пучка происходит только вблизи поверхности и не достигает зоны соединения практически при любых параметрах раstra, если толщина облицовки превышает 1 мм;

- если термомеханическим (в частности, термоциклическим) испытаниям подвергается поверхность макета, то для выбора параметров раstra надо учитывать особенности циклической усталости материала поверхности. На рис. 5 представлена типичная кривая циклической усталости, которая показывает, что для большинства материалов существует значение прикладываемых напряжений σ_R , называемое обычно пределом долговечности, при котором, вне зависимости от увеличения

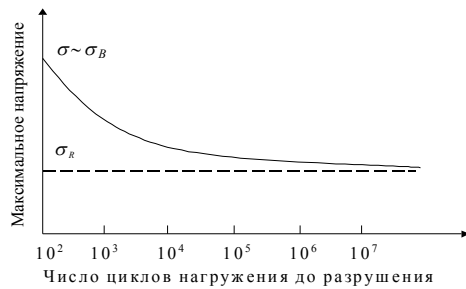


Рис. 5. Типичная кривая циклической усталости материала

числения не превышала 10—20% значения амплитуды основного термоцикла. Это означает в рассмотренном нами случае (см. рис. 4, *a—в*), что при выборе $d/R = 1,625$ мы заведомо исключили влияние микроциклирования на поверхности. При $d/R = 0,5$ и менее влияние дополнительного микроциклирования поверхности макета пучком может негативно сказаться на результатах основного (макроциклирование) эксперимента.

С точки зрения продолжительности теплового импульса эти эксперименты можно также разделить на следующие три группы: импульсные (существенно нестационарные), квазистационарные, длительные (существенно стационарные).

Об экспериментах первого типа, характерных при имитации переходных плазменных режимов, подробнее говорится ниже. Квазистационарные эксперименты имеют дело с формированием поля температур (и, следовательно, термонапряжений), близкого к номинальным условиям, путем выхода на режим, близкий к стационарному. На рис. 6 изображен процесс нагрева охлаждаемых водой плоских многослойных мишеней различной композиции под действием различных нагрузок. Видно, что, для каждого варианта мишени абсолютный температурный стационар будет достигнут после 25—30 с. В то же время как по уровню абсолютных температур (90% номинала), так и по их разнице между слоями практически значимый квазистационарный режим достигается уже через 10—15 с. Это обстоятельство используется для организации термоциклических испытаний, в которых с целью сокращения временных затрат используются укороченные импульсы при нагреве и короткие паузы при охлаждении. Данный подход не позволяет проимитировать такие эффекты, как ползучесть, но вполне пригоден для имитации циклической усталости материалов и соединений.

Для имитации ползучести, долговременной прочности, коррозионного износа и т.д. требуется проведение экспериментов в режиме реального времени. В них имитируется полный цикл (для ИГЭР 400 с и более), в течение которого заведомо все температурные процессы выходят на стационар.

При испытаниях технологических макетов и макетов конструкции сложилась следующая триада последовательных термомеханических испытаний: измерение теплового отклика, достижение порога разрушения (screening), термоциклика.

На первом этапе при тепловых нагрузках, начиная с небольших, проводятся измерения теплового отклика конструкции при квазистационарном (> 30 с) тепловом

числа циклов, разрушения не наступают. Обычно это значение для разных материалов находится в пределах от 0,2—0,5 σ_B (предел прочности) и не превышает значения σ_{02} (предел упругости). Поскольку возникающие термонапряжения в поверхности макета пропорциональны амплитуде термоцикла, то для обеспечения долговечности (гарантированное исключение влияния микроциклирования) необходимо, чтобы амплитуда микроцикли-

нагрузении. В этом режиме наиболее тщательно измеряются температуры и решаются следующие задачи:

— калибровка измерительных приборов, в частности, в отсутствие теплоносителя достигается изотермический (по глубине) прогрев макета и сравнение показаний тепловизора или пирометра с надежными (не зависящими от степени черноты и т.п.) показаниями термопар, внедренных в тело макета;

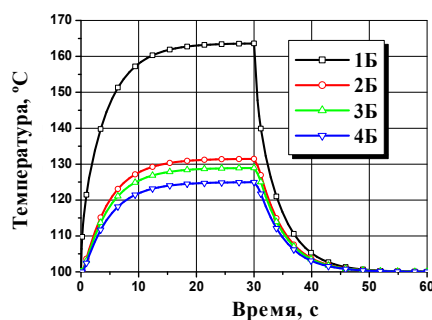
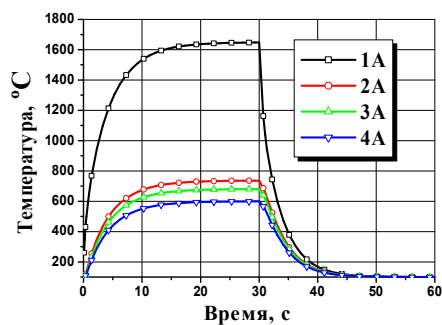
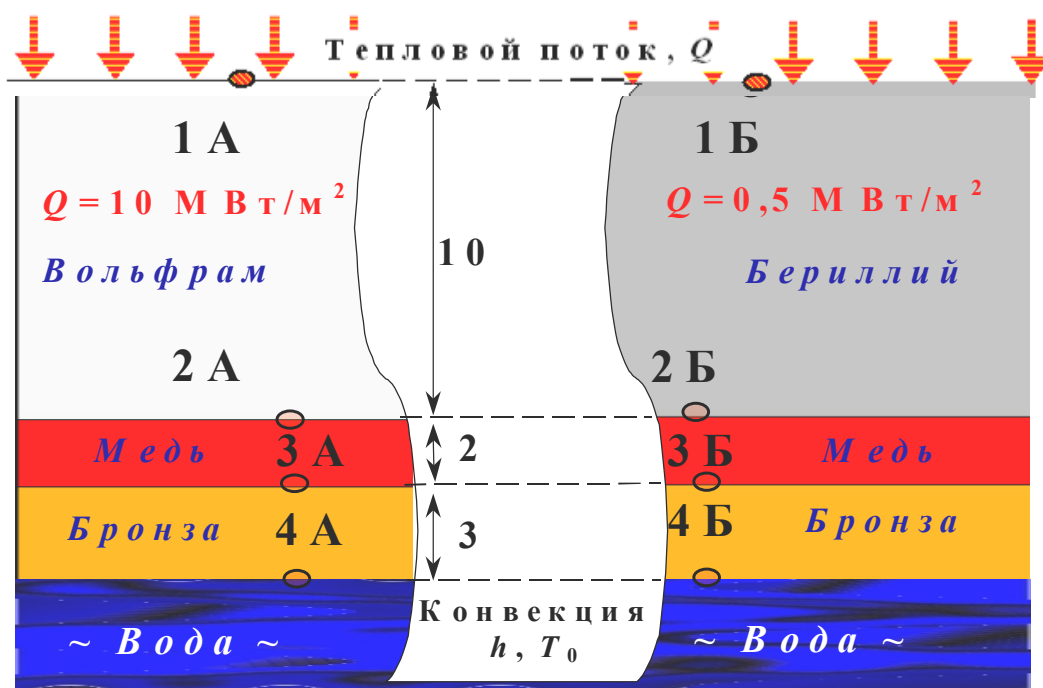


Рис. 6. Кинетика нагрева и охлаждения многослойных мишеней: $h=20\,000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, $T_0=100\text{ °С}$

— обнаружение крупных дефектов в соединениях облицовки и охлаждаемой подложки, о чем свидетельствует неравномерность нагрева различных участков облицовки;

— выяснение соответствия между расчетным значением и экспериментом, что позволяет иногда выявить ошибки при изготовлении макетов, использование не тех материалов, отклонения в режимах охлаждения, неисправность диагностической аппаратуры.

Если макет изготовлен удачно, нагрузку поднимают до номинальной, после чего этот этап испытаний обычно заканчивается.

На втором этапе имеет смысл выяснить предельную тепловую нагрузку, при которой наступает термомеханическое разрушение конструкции или ее частей. Ступенчато (по 1—10 термоциклов на каждой ступени) повышая тепловую нагрузку (в том числе до значения выше номинала), добиваются заметного повреждения конструкции. Если теплогидравлический режим выбран с запасом, то может наблюдаться появление следующих повреждений: частичное или полное отслоение облицовочной плитки от подложки, растрескивание материала плитки вдоль или поперек направления потока, заметная деформация охлаждаемой подложки, течь теплоносителя и т.д. При соответствующем статистическом материале данные испытания позволяют узнать предельные для данного варианта конструкции нагрузки, а также наиболее слабые ее места. Кстати сказать, иногда термомеханического предела достичь не удается [17].

На заключительном этапе проводится термоциклический эксперимент. Выбор величины тепловой нагрузки, при которой происходит набор циклов, зависит от нескольких факторов. Если на втором этапе испытаний порог разрушения лежит заметно выше номинальной проектной нагрузки, то термоциклические испытания можно проводить в номинальном режиме, добиваясь реализации проектного числа циклов. Если же это число практически (с учетом вопросов стоимости) в эксперименте не достижимо, то можно воспользоваться предсказанием термоциклического ресурса, принимая во внимание характер кривой циклической усталости (см. рис. 5). Видно, что если удастся получить несколько точек на кривой при относительно небольшом практически достижимом числе циклов (от 10^2 до $5 \cdot 10^3$), требующих нагрузку выше номинальной, то можно, экстраполировав эту кривую, получить (причем с консервативным запасом, имея в виду, что с ростом числа циклов эта кривая становится более полой, асимптотически приближаясь к пределу долговечности) оценку ресурса при номинальной нагрузке и проектном числе циклов. Поэтому, как правило, для создания банка данных о термоциклической стойкости материалов и конструкций мы после определения порога разрушения проводим термоциклические испытания при нагрузках на 10—40% ниже предельной.

Альтернативное устройство имитации поверхностной тепловой нагрузки. Как уже отмечалось, длительные эксперименты на стенде ЦЕФЕЙ довольно дороги, поэтому для проведения некоторых ресурсных испытаний потребовалось создание простого и дешевого имитатора, основанного на более простых электротехнических методах без пучка и вакуума. Если для испытаний элементов первой стенки, требующих нагрузки от 0,3 до 1 МВт/м², во всем мире получили распространение нагреватели с зеркальными панелями и набором кварцевых галогенных ламп, то для испытаний диверторных мишеней (нагрузка 5—30 МВт/м²) простых (непучковых) методов практически реализовано не было. Такая попытка была предпринята, и в основу был положен принцип джоулева нагрева резистивной вставки, зажатой между двумя металлическими электродами, один (или оба) из которых представляет собой макет испытываемой диверторной мишени (рис. 7) [8]. Материалом вставки были выбраны соответствующие сорта графита (в том числе мягкого), обладающие необходимым комплексом свойств. Основные проблемы при решении данной

задачи связаны с оптимизацией контактных тепловых и электрических сопротивлений, возникающих на границах раздела. В результате были получены следующие практические результаты:

— для стенда коррозионных испытаний в университете г. Леувен (Бельгия) было спроектировано, изготовлено и испытано устройство нагрева с тепловой нагрузкой 10 МВт/м^2 , равномерно выносимой на макеты с поверхностью $20 \times 100 \text{ мм}$. Надежная работа устройства продемонстрирована на протяжении более 300 ч;

— для стенда теплогидравлических испытаний в лаборатории ENEA (Италия) было спроектировано, изготовлено и испытано устройство нагрева с тепловой нагрузкой от 10 до 40 МВт/м^2 , равномерно выносимой на поверхность макетов с площадью $\sim 6 \text{ см}^2$. При предельных нагрузках (40 МВт/м^2) стабильная (без выгорания нагревателя) работа нагревателя продемонстрирована при импульсах продол-

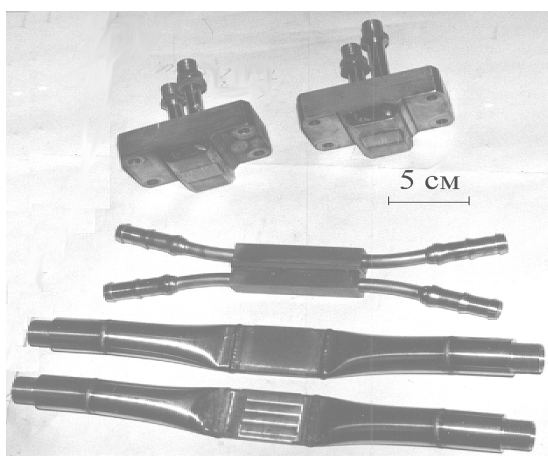
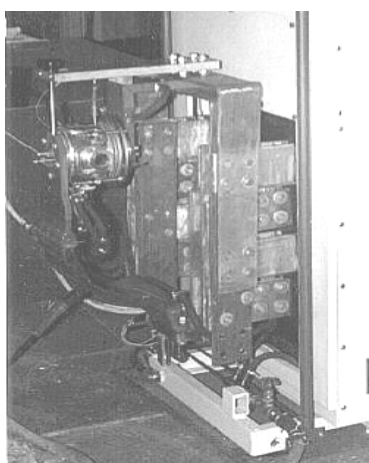
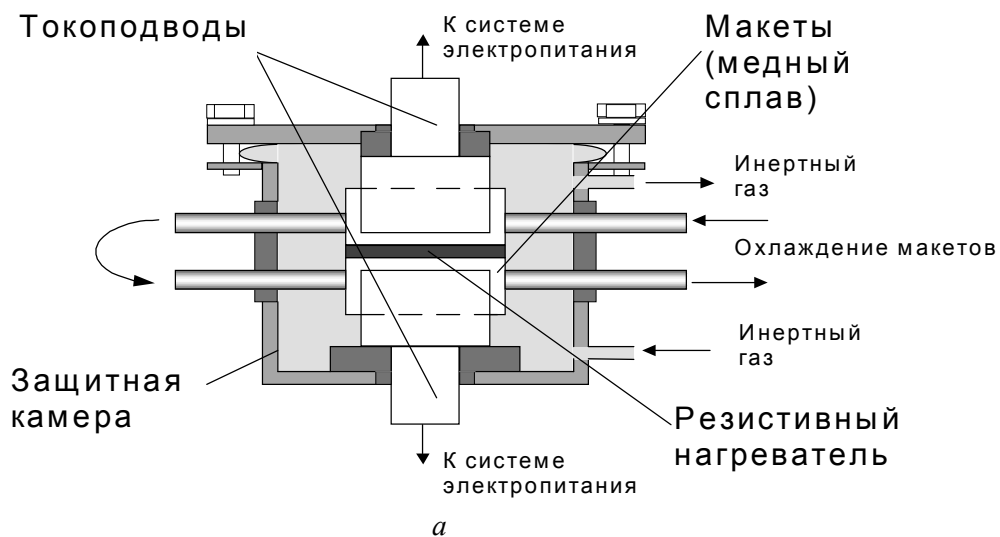


Рис. 7. Схема (а), внешний вид установки (б) и макетов (в) для имитации интенсивных тепловых потоков с помощью резистивной вставки

жительностью до нескольких минут, что является достаточным для проведения теплогидравлических экспериментов.

Таким образом, в дополнение к стенду ЦЕФЕЙ был разработан альтернативный метод теплового нагружения, имеющий заметные преимущества при проведении длительных и/или дешевых испытаний. Другим примером удачного применения данного метода является использование нагревателя в условиях сильного (~1,5 Тл) магнитного поля в экспериментах с тепловой трубой, когда использование электронного пучка было невозможным.

МЕТОДЫ ИМИТАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Тепловое воздействие на материалы и конструкцию в переходных плазменных режимах может быть очень существенным, а потому проблема имитации этих режимов является весьма актуальной. В табл. 2 приведены основные параметры переходных плазменных процессов, приводящих к выносу тепла на поверхность «первой стенки». Для имитации наиболее медленных процессов, таких, как VDE, можно использовать стационарные ускорители. Они позволяют получить необходимые плотность энергии на поверхности и продолжительность импульса. Существенным

Т а б л и ц а 2. Параметры тепловых нагрузок на компоненты «первой стенки» при переходных плазменных процессах в реакторе ИТЭР

| Параметр | Срывы тока плазмы | Вертикальные смещения (VDE) | Краевые моды типы I ELM's | Убегающие электроны |
|--|----------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| Плотность выносимой энергии, МДж/м ² (с учетом экранир.) | 10—100 10 | ≤ 60 | ~1 | ~15 |
| Длительность импульса, мс | 1—10 | ≤ 300 | 1 | ~100 |
| Частота повторения, Гц | 2,5·10 ⁻⁴ | 2,5·10 ⁻⁵ | 1—10 | < 2,5·10 ⁻⁴ |
| Энергия частиц, кэВ | 0,1—10 | 0,1—10 | 0,1—10 | > 10 ³ |

недостатком этих ускорителей является недостаток общей мощности, что позволяет осуществить нагружение всего 1—5 см² поверхности мишени, что зачастую заметно меньше площади поверхности даже одной облицовочной плитки (для первой стенки площадь одной Ве-плитки равна 30 см²). При воздействии VDE представляют опасность два фактора: перегрев поверхности облицовки, приводящий к оплавлению и растрескиванию, а также последующее повышение на несколько сотен градусов температуры в зоне соединения облицовки с подложкой, что грозит отслоением облицовки и/или повреждением подложки. Воздействие первого фактора воспроизводится на части поверхности при прямой имитации условий VDE с помощью максимально сфокусированного пучка, направляемого на облицовку на короткое время (0,1—0,5 с). При этом происходит перегрев сравнительно тонкого слоя облицовки без расплзания тепла поперек зоны облучения, и такая имитация вполне достаточна, чтобы сравнить повреждения различных вариантов облицовки, отличающихся как материалом, так и геометрией плиток. Для имитации повреждений в зоне соединений для относительно толстой облицовки (~10 мм) необходимо

учитывать расползание тепла поперек зоны облучения. Поэтому для правильной имитации используется пучок меньшей плотности (для полного покрытия хотя бы одной плитки), но большей продолжительности ($>0,3$ с), чтобы обеспечить необходимое повышение температуры в зоне соединения.

Для имитации других переходных процессов удельной мощности стационарных ускорителей уже, как правило, не хватает. Необходимую плотность энергии можно получить лишь в специальных импульсных ускорителях заряженных частиц или плазмы и лазерах. В табл. 3 приведены основные параметры нескольких российских ускорителей, которые были отобраны и использованы для имитации этих процессов.

Т а б л и ц а 3. Основные параметры плазменных установок для имитации переходных тепловых процессов в токамаке

| Параметр | МК-200UG (ТРИНИТИ) | ВИКА (НИИЭФА) | ГОЛ-3-II (ИЯФ, Новосибирск) |
|---|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Тип установки | Магнитная ловушка | Плазменный ускоритель типа КСПУ | Магнитная ловушка |
| Плотность выносимой энергии, МДж/м ² | ≤ 15 | ≤ 30 | 2 (10) |
| Продолжительность импульса, мс | 0,04—0,05 | 0,1—0,4 | 0,01—0,02 |
| Энергия частиц, кэВ | 1,5 (ионы) 0,15 (электроны) | 0,1 (ионы) | 800 (электроны) 1—3 (ионы) |
| Диаметр пучка, см | 6,5 | 3,0 | 6,5 |
| Магнитное поле, Тл | 2 (естеств.) | 5 (искусст.) | 0,5 (естеств.) |

Как показали первые же сравнительные эксперименты с использованием лазеров, электронных и плазменных ускорителей, наиболее адекватными для имитации условий срыва тока плазмы оказались плазменные ускорители [18—21]. Это связано с тем, что при срывах плазмы продукты тепловой эрозии материала, взаимодействуя с набегающей плазмой, создают в течение нескольких микросекунд плотное плазменное образование, которое становится малопрозрачным для потоков, продолжающих поступать в зону взаимодействия. Использование высокоэнергетичных (>100 кэВ) электронов для имитации срывов обеспечивает доставку необходимого количества тепла до мишени, однако условия этой доставки характеризуются следующим:

— характер выделения тепла электронами при коротких импульсах в твердом теле не носит поверхностного характера в отличие от условий в токамаке;

— энергетичные электроны сравнительно легко пронизывают облако, состоящее из продуктов эрозии, и поэтому слабо экранируются;

— при той же плотности потока тепла электроны имеют меньший импульс по сравнению с плазмой и, следовательно, практически не способствуют уплотнению облака набегающим потоком;

— условия ионизации продуктов эрозии набегающим потоком также различны для высокоэнергетичных электронов и плазмы.

Становится очевидным, что физика взаимодействия с твердым телом излучения, отличного от токамачной плазмы, существенно другая. Это касается как элек-

тронов, так и лазерного излучения, для которого перечень отличий другой, но также значительный.

Таким образом, в экспериментах, где помимо выноса определенного количества тепла на поверхность нас интересуют условия у поверхности (давление, массоперенос и т.п.), мы должны использовать преимущественно плазменные ускорители.

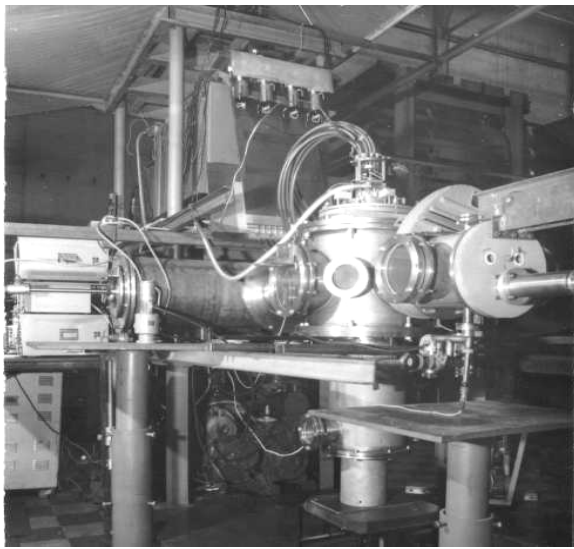
По степени приближения к условиям ИТЭР различные плазменные ускорители также отличаются друг от друга. На ускорителе МК-200UG [22] энергия ионов и наличие естественного магнитного поля, вдоль которого течет плазма, создают условия, максимально приближенные к ИТЭР. Это позволяет наиболее адекватно изучать условия переноса энергии между мишенью и плазмой, эрозию и массоперенос материала. Однако малая продолжительность импульса (<50 мкс), а также невысокое давление относительно горячей плазмы не позволяют проимитировать те режимы воздействия (поведение расплавленного слоя на поверхности облицовки), при которых принципиально иметь максимальную продолжительность импульса и адекватное давление плазмы.

Это удастся сделать на стенде ВИКА (рис. 8) [23], где благодаря более плотной и холодной плазме удастся достичь более высоких давлений, а большая продолжительность импульса обеспечивает более глубокое проплавление поверхности и большее время для смещения жидкого металла. Источником мощных плазменных потоков является квазистационарный плазменный разряд в ускорителе с коаксиальными электродами. Высоковольтное питание осуществляется от конденсаторной батареи с запасенной энергией ~ 50 кДж. Параметры плазменного потока сертифицированы с помощью специально созданного диагностического комплекса, включающего лазерный интерферометр для определения пространственного распределения плотности плазмы в потоке и калориметр-маятник для измерения импульса и энергосодержания плазменного потока. Плазменный ускоритель расположен в верхней части камеры взаимодействия, диаметр которой равен 400 мм. Она снабжена шлюзом для ввода образцов с помощью специального держателя. Высоковакуумная откачка проводится с помощью турбомолекулярного насоса. Установка оснащена системами, позволяющими прогревать образцы до 1500 °С и облучать их плазменными потоками в присутствии магнитного поля с индукцией 5 Тл.

На рис. 8 показан макет со следами плазменного воздействия, приводящего к оплавлению и растрескиванию материалов. Видны следы перемещения расплавленного слоя, подтверждающие влияние радиально несимметричного плазменного давления.

Для измерения величины эрозии материала применяли весовую методику и профилометрию. Степень и характер рекристаллизации и растрескивания поверхностного слоя изучали с помощью традиционных методов металлографии, электронной микроскопии, элементного и фазового анализа [24].

Для имитации режимов убегающих электронов наиболее естественно использовать высокоэнергетичные электроны, возможность получения которых существует, например, на установке ГОЛ [25] в Новосибирске. Работы по имитации этих режимов на данном этапе не получили большого развития, поскольку в проекте ИТЭР убегающие электроны рассматриваются как крайне нежелательные, и выражается надежда на их отсутствие.



a



б

Рис. 8. Стенд ВИКА (*a*) и макет «первой стенки» с W-облицовкой (*б*) после воздействия плазмы

ИМИТАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ, ТЕПЛА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Поскольку имитационные испытания в сравнении с расчетом обеспечивают более точное предсказание ресурса конструкции, была сделана попытка обеспечить максимально полное одновременное воздействие основных повреждающих факторов: тепла, нейтронов и корпускулярных потоков, вызывающих эрозию поверхности и имплантацию водородных потоков в твердое тело. Помимо прямого влияния каждого такого фактора на поведение, например, облицовки имеет место также опосредованное через их взаимодействие (рис. 9). Очевидно, что ресурс облицовки при таком подходе будет определен точнее, чем при измерении каждой нагрузки в отдельности.

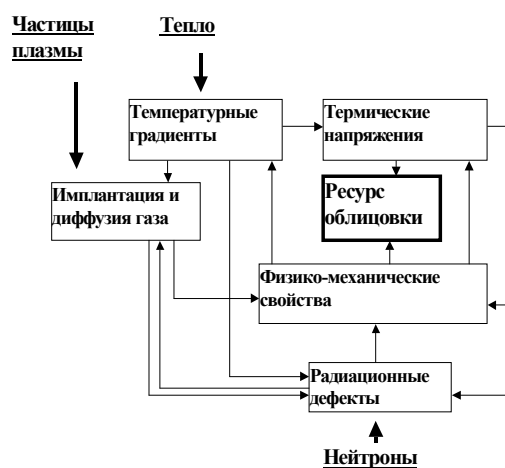


Рис. 9. Взаимодействие основных повреждающих факторов и их влияние на ресурс

Рассмотрим возможности имитации всех рассмотренных факторов. Необходимо отметить, что получение высокоэнергетичных (0,1—1 кэВ) ионов, приводящих к постоянному распылению материала, в условиях реакторного облучения невозможно, так как это требует ввода внутрь реактора напряжений масштаба 0,1—1 кВ, что не-

допустимо по условиям безопасности (вероятность дугообразования и т.п.). Но некоторые аспекты воздействия ионных потоков — внедрение газовых частиц в твердое тело, структурные изменения поверхности, вызванные воздействием плазмы — проимитировать можно.

Структурных изменений поверхности (образование эрозионного микрорельефа и селективного изменения химсостава) можно добиться и вне реактора, получив образцы облицовки, испытавшей различные по продолжительности фазы эрозионного разрушения. Обеспечения же непрерывной имплантации газовых частиц (водорода) в приповерхностный слой можно добиться в определенных условиях непосредственно в реакторе. Известно, что диссоциированные атомы водорода не испытывают преград при проникновении сквозь чистую поверхность твердого тела, что с точки зрения насыщения материала газом эквивалентно поверхностной ионной бомбардировке. Наличие тепловой нагрузки легко обеспечить, поместив испытываемый макет в канал экспериментального ядерного реактора. При выборе его типа приходится учитывать следующие соображения:

— плотность потока нейтронов и их спектр должны обеспечивать близкую к реальной картину образования радиационных дефектов как по скорости образования, так и по составу этих дефектов. Отсутствие в мире мощного источника нейтронов с энергией 14 МэВ исключает возможность абсолютно точного воспроизведения необходимого нейтронного спектра. В этой ситуации специалисты по физике радиационных повреждений выбрали в качестве наиболее адекватных реакторы двух типов: с относительно высокой плотностью потока нейтронов ($>10^{14}$ см⁻²·с⁻¹) и со смешанным спектром, т.е. сравнимыми долями как быстрых ($>0,1$ МэВ), так и медленных нейтронов. Первые обеспечивают необходимую скорость радиационных смещений, а также образование, например, атомов гелия, влияющих на процессы охрупчивания и распухания. Вторые с медленными же нейтронами, более эффективны в образовании трансмутантных атомов, которые (например, Zn в Cu) могут повлиять на такие физико-механические свойства, как тепло- и электропроводность;

— необходима совместимость теплоносителя реактора и макета. Очевидно, например, что активное охлаждение водой макета дивертора по соображениям безопасности невозможно в быстром реакторе с жидкометаллическим (Na) теплоносителем;

— в экспериментальном канале должно быть пространство для размещения макета и средств нагрева;

— следует предусмотреть возможность обслуживания канала в процессе работы реактора. Для контролируемого эксперимента могут потребоваться вывод термомпар, подача и откачка газа, перемещение предметов в пределах активной зоны и вне ее.

Среди ряда российских реакторов, используемых по программе УТС, нами были выбраны СМ-3 и РБТ-6 в НИИАР (г. Димитровград).

Наибольшую сложность и новизну представляет проблема имитации высоких поверхностных нагрузок и их цикличности в стесненных условиях экспериментального канала ($D = 60—70$ мм, $L = 350$ мм). Для решения этой проблемы было рассмотрено множество вариантов, на практике же реализованы три из них [9, 27].

На рис. 10 схематично представлены поперечное сечение канала и размещение испытываемого макета и используемого нагревателя, на рис. 11 — вид экспериментальных сборок для внутриреакторных экспериментов.

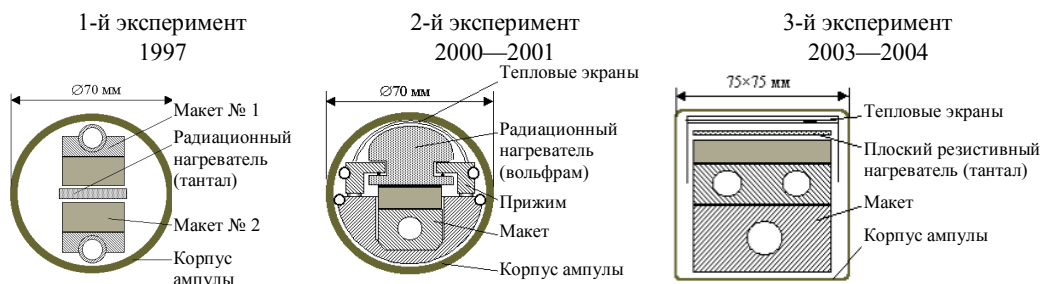


Рис. 10. Принципиальная схема экспериментальных сборок

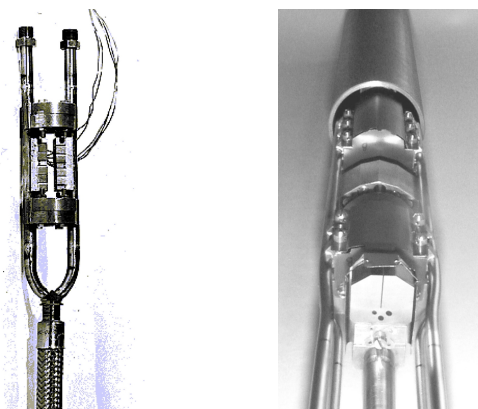


Рис. 11. Вид экспериментальных сборок для внутриреакторных экспериментов

Основные параметры экспериментальных сборок (эксперименты 1, 2, 3):

| Реактор и номер канала | СМ, канал № 2 | СМ, канал Д8 | РБТ |
|---|---------------------------------|-----------------------------|--|
| Среда, давление, Па ... | Водород, 10^3 | Гелий, $5 \cdot 10^3$ | Гелий, $3 \cdot 10^5$ |
| Нейтронный флюенс, см^{-2} ... | $\approx 2,5 \cdot 10^{20}$ | $\approx 2,5 \cdot 10^{20}$ | $\approx 5 \cdot 10^{20}$ |
| Способ теплопередачи от нагревателя на поверхность макета ... | Излучение, диссоциация водорода | Прямой тепловой контакт | Теплопроводность гелиевого слоя, излучение |
| Температура нагревателя, °С ... | 1950 | 2000 (максимальная) | 1300 |
| $q_{\text{поверх.}}$, МВт/ м^2 ... | 3,2 | 6—8,0 | 0,5 |
| Количество тепловых циклов ... | 100 | 1000 | 20 000 |
| Температура охлаждающей воды, °С ... | 70 | 70 | 60 |

В 1-м эксперименте плоская толстая (10 мм) танталовая пластинка размещалась в зазоре между двумя трубчатыми макетами дивертора (Be—CuCrZr в композиции), повернутыми друг к другу между пластиной, нагретой ядерным излучением ($\gamma+n$) до температуры 1950 °С, и поверхностью макетов выдерживался зазор шириной 1 мм, и вся ампула наполнялась водородом при давлении $\sim 10^3$ Па. Передача тепла от нагревателя к макетам осуществляется излучением (частично), но в основном теплопроводностью в зазоре, наполненном водородом. Таким образом, удалось обеспечить поверхностную тепловую нагрузку 3,2 МВт/ м^2 , что подтверждено показаниями градиентного измерителя потока, встроенного в макет, а также модельными экспериментами вне реактора [26]. При этом часть водородных молекул в зазоре после

диссоциации на горячей пластине в виде водородных атомов могла достичь поверхности макета и обеспечить внедрение газа в облицовочный материал. Термоциклирование достигалось путем быстрого подъема и возврата в активную зону ампулы с макетом, размещенным на вертикальном подъемном устройстве. При этом реакторная вода непрерывно протекала по трубам охлаждения макета за счет разницы давлений сверху и снизу от активной зоны.

Во 2-м эксперименте тепловая нагрузка создавалась посредством нагрева толстой яйцевидной W-плитки, которая прижималась через мягкую графитовую теплопроводящую прокладку к поверхности испытываемого макета (W—CuCrZr-композиции). Ядерное ($\gamma+n$) тепло нагревало пластинку до 2000 °С, а упругость прижима обеспечивалась пружинами, спрятанными с тыльной холодной стороны макета. Термоциклика, как и в 1-м эксперименте, осуществлялась за счет подъема (с возвратом) из активной зоны всей ампулы, при этом в отсутствие реакторного излучения W-пластина остывала и, следовательно, исчезала поверхностная нагрузка. Сравнение с расчетом, а также прямое определение температур (макета и нагревателя) термометрами и теплового потока градиентным измерителем позволили узнать создаваемую поверхностную нагрузку в диапазоне от 6 до 8 МВт/м² для различных частей сборки.

В 3-м эксперименте для достижения в тонком Ta-нагревателе температуры 1300 °С предлагается использовать омический нагрев, для чего в реакторный канал и герметичную ампулу вводятся два электрода, обеспечивающие напряжение до 30 В и ток до 1000 А. Для передачи тепла от нагревателя к поверхности макета (Be—CuCrZr—SS-композиции) используется излучение и теплопроводность гелия (>1000 Па), находящегося в зазоре шириной около 1 мм. В отличие от 1-го и 2-го экспериментов в данном случае для термоциклирования не применяется перемещение ампулы, тепло регулируется системой электропитания, расположенной у крышки реактора. Помимо диагностики параметров нагружения непосредственно в процессе облучения (температуры, тепловые потоки, число импульсов, накопление дозы) использовался целый комплекс средств для изучения состояния макетов после испытаний в «горячих» камерах. Он включает разделку макетов на любые части, удобные для последующего анализа, фотографирование их на разных этапах разделки, изготовление шлифов, оптическую и растровую микроскопию, измерение микротвердости, теплопроводности и т.д.

ИМИТАЦИЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ТОКАМАКА

Данный пример разработки имитационного стенда связан с проблемой исследования возможностей различных конструктивных вариантов диверторных теплоприемных устройств, использующих для охлаждения жидкие металлы. Известно, что теплогидравлические параметры (гидравлическое сопротивление, коэффициенты теплоотдачи и т.п.) таких устройств зависят от величины и направления магнитного поля. В частности, для жидкометаллических тепловых труб отсутствовали какие-либо экспериментальные данные о таком влиянии, и встал вопрос о проведении соответствующего эксперимента. Стенд ТТ, созданный в НИИЭФА (рис. 12, 13),

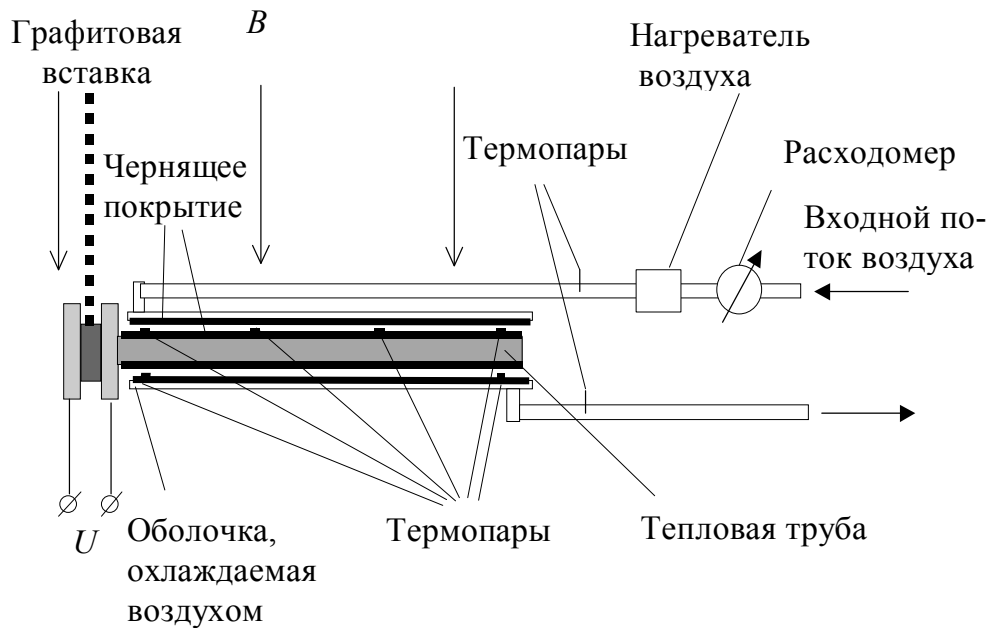


Рис. 12. Стенд ТТ, схема эксперимента по испытанию тепловых труб в магнитном поле

имеет следующие основные особенности. В межполюсном зазоре электромагнита шириной 5 см с плоскими полюсными наконечниками, имеющего поле до 1,5 Тл, помещена вакуумная камера, в которой происходят нагрев и испытания тепловой трубы. Вакуумные условия необходимы из-за несовместимости нагретых тугоплавких металлов (Nb, Ta, W), из которых обычно изготавливают высокотемпературные тепловые трубы, с атмосферным окружением. Вопрос имитации необходимых для проведения испытаний поверхностных тепловых нагрузок в диапазоне значений от 1 до 10 МВт/м² является непростым из-за наличия сильного магнитного поля, поперечного к направлению теплового потока и затрудняющего использование пучков заряженных частиц. Это же поле усложняет использования графитовой резистивной вставки, нагреваемой током и зажатой с использованием прокладок из мягкого графита между токоподводом и нагреваемым торцом тепловой цилиндрической трубы (см. рис. 12). Для изучения влияния силы тяжести конструктивно была предусмотрена возможность изменения наклона всей сборки относительно горизонта. Для измерения теп-

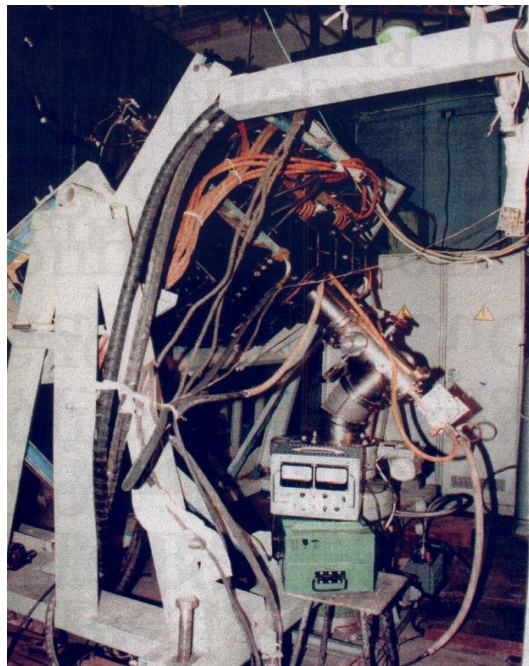


Рис. 13. Фотография стенда ТТ

ловых потоков, температур и баланса мощности использовались термопары и газовый калориметр с прокачкой гелия. Таким образом, удалось провести пионерский эксперимент по влиянию магнитного поля на теплопроводящие свойства жидкометаллической тепловой трубы [28].

ВЫВОДЫ

Рассмотрены потребности и возможности имитации основных повреждающих факторов ТЯР. Обоснован выбор конкретных типов электронных и плазменных ускорителей для имитации поверхностных тепловых нагрузок.

Создан экспериментальный комплекс на базе электронно-лучевого стенда ЦЕФЕЙ и стенда резистивной вставки, позволяющий имитировать квазистационарное тепловое нагружение поверхности в диапазоне нагрузок $0,1\text{—}40\text{ МВт/м}^2$, перекрывающем основные потребности реактора-токамака, разработан и внедрен комплекс соответствующих методик для проведения тепловых испытаний макетов конструкции «первой стенки».

Создан стенд ВИКА на основе ускорителя плазмы типа КСПУ, обеспечивающий условия имитации тепловых режимов срыва тока плазмы (Q до 30 МДж/м^2 , $t=0,1\text{—}0,4\text{ мс}$).

Разработаны и внедрены оригинальные внутрореакторные методики комплексного теплового и нейтронного воздействия для испытаний макетов конструкций с активным охлаждением в широком диапазоне поверхностных нагрузок ($0,5\text{—}8\text{ МВт/м}^2$), числа термоциклов ($10^2\text{—}10^4$) и доз облучения.

Создан стенд ТТ для испытания режимов теплосъема жидкометаллической тепловой трубы в условиях магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Володин А.А., Мазуль И.В., Саксаганский Г.Л. и др.** Исследование эрозии поверхности углеродосодержащих материалов и покрытий под действием ионной бомбардировки. — ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1983, вып. 5 (28), с. 41—49.
2. **Гиниятулин Р., Касаткин А., Комаров В. и др.** Установка для исследования материалов и элементов конструкций разрядных камер ТЯР под действием тепловых нагрузок. — ВАНТ. Сер. Электрофизическая аппаратура, 1993, вып. 26, с. 36—42.
3. **Barabach V.R., Bykov V.A., Giniyatulin R.N. и др.** Beryllium mock-ups development and ultrasonic testing for ITER divertor conditions. — In: Proc. of 18th Symp. on Fus. Technology (Karlsruhe, 1994), vol. 1, p. 307—310.
4. **Watson R.D., Croesmann C.D., Dempsey J.F., Watkins J.G.** Sandia National Laboratories. SAND 87-2452, 1987.
5. **Duwe R., Kuhnlein W., Munstermann H.** The new electron beam facility for materials testing in hot cells. Design and preliminary experience. — In: Proc. of 18th Symp. on Fus. Technology (Karlsruhe, 1994), vol. 1, p. 355—358.
6. **Akiba M. et al.** Performance of JAERI electron beam irradiation stand, plasma. — Devices and Operation, 1991, vol. 1, p. 205—212.
7. **Mayaux G. et al.** — Fusion Technology, 1992, vol. 1, p. 317.
8. **Litunovsky N.V., Komarov V.L., Mazul I.V.** Development of alternative surface thermal loading simulation. — Fusion Eng. and Design, 2000, vol. 51—52, p. 803—807.

9. **Giniyatulin R., Mazul I., Melder R. et al.** In-pile thermocycling testing and post-test analysis of beryllium divertor mockup. — In: Proc. 3rd IEA Workshop Beryllium Techn. for Fusion (Japan, JAERI conf. 98—001, Oct. 1997), p. 221—227.
10. **Vernickel H.** Thermal processes in tokamaks of the next generation and future reactors. — *J. Nucl. Mater.*, 1982, vol. 111—112, p. 531—540.
11. **Gagen-Torn V.K., Kirillov I.R., Komarov V.L. et al.** Experimental complex for high flux. Materials Interaction Research. — In: Proc. of 18th Symp. on Fusion Technology (Karlsruhe, August 1994), p. 363—366.
12. **Rodig M., Akiba M., Chappuis P. et al.** Comparison of electron beam test facilities for testing of high heat flux components. — *Fusion Eng. and Design*, 2000, vol. 51—52, p. 715—722.
13. **Burtseva T.A., Dovguchits E.F., Mazul I.V. et al.** Resistance of carbon based materials for ITER divertor under different radiation fluxes. — *J. Nucl. Mater.*, 1992, vol. 191—194, p. 309—314.
14. **ITER** Final Report on Task T8224. Test of Divertor Bumper Cooling. G18 TTfr19FR. October 1998.
15. **Gervash A., Giniyatulin R., Komarov V.L. et al.** Comparative thermal cyclic testing and strength investigation of different Be—Cu Joints. — *Fus. Eng. and Design*, 1998, vol. 39—40, p. 543—549.
16. **Giniyatulin R., Gervash A., Komarov V.L. et al.** High heat flux tests of mock-ups for ITER divertor application. — *Ibid.*, p. 385—391.
17. **Филатов О.Г., Мазуль И.В.** Макетирование и испытания элементов «первой стенки» реактора ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2003, вып. 2, с. 27—48.
18. **Barabash V.R., Baranov A.G., Gahl J. et al.** Experimental studies of pulse plasma—carbon materials interaction during the simulation on thermal quench phase of tokamak plasma disruption. — *J. Nucl. Mater.*, 1992, vol. 187, p. 298—302.
19. **Barabash V., Baranov A., Burtseva T. et al.** Damage of refractory metals and carbon-based materials under simulation of the thermal influence at plasma disruption. — *Fus. Eng. and Design*, 1991, vol. 18, p. 145—150.
20. **Linke J., Barabash V., Bolt H. et al.** Erosion of metals and carbon-based materials during disruptions simulation experiments in plasma accelerators. — *J. Nucl. Mater.*, 1994, vol. 212—215, p. 1195—1200.
21. **Linke J., Akiba M., Bolt H. et al.** — *Ibid.*, 1992, vol. 196—198, p. 607.
22. **Arkhipov N., Bakhtin V., Kurkin S.** Materials erosion and erosion products in disruption simulation experiments at the MK-200UG facility. — *Fus. Eng. and Design*, 2000, vol. 49—50, p. 151.
23. **Drozdov A., Litunovsky V., Lublin B. et al.** Quasistationary plasma accelerators for experiments on thermonuclear fusion and technology. — *Plasma Devices and Operations*, 1992, vol. 2, p. 101—123.
24. **Linke J., Akiba M., Mazul I.** — In: Proc. Workshop on Thermal Shock and Thermal Fatigue Behaviour of Advanced Ceramics (Ringberg, 1992).
25. **Astrelin V.T., Burdakov A.V., Filippov V.V. et al.** Electron and hot plasma stream-target interaction experiments under simulated ITER plasma disruption conditions at the GOL-3 facility. — In: Proc. of 18th Symp. on Fusion Technology (Karlsruhe, 1994), p. 371—374.
26. **Mazul I., Prokofiev Yu.** Some alternative design options and R&D works for ITER divertor in Russia. — Presented 3d Intern. Symp. Fusion Nucl. Technology. (Los Angeles, 1994).
27. **Gervash A., Mazul I., Litunovsky N., Pokrovsky A.** Thermal fatigue properties and results of in-pile integrated test of Be/CuCrZr and Be-glidcop joints produced by fast brazing. — В сб.: Труды V рабочей группы Междунар. энергетического агентства по бериллию. Перспективные материалы. Спец. вып. — М.: Интерконтакт Наука, 2002, с. 44—47.
28. **Makhankov A., Anisimov A., Arakelov A. et al.** Liquid metal heat-pipes for fusion application. — *Fus. Eng. and Design*, 1998, vol. 42, p. 373—379.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2003 г.
 Вопросы атомной науки и техники.
 Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 3, с. 3—31.