

УДК 621.039.619:621.039.634:669.27

## ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ДИВЕРТОРА ИТЭР ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ

*А.В. Еремкин, А.В. Володин, А.И. Кокоулин, А.О. Комаров, В.Е. Кузнецов, А.С. Малышев, Н.Б. Степанов*  
*АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия*

В статье представлены краткий обзор испытательного стенда ITER Divertor Test Facility (IDTF) в АО «НИИЭФА» и описание проходящих на нём испытаний интенсивными тепловыми потоками обращённых к плазме компонентов дивертора ИТЭР. Объясняется роль дивертора и выбора вольфрама как материала его облицовки. Испытательный стенд IDTF является уникальным для России, так как на нём проходят тепловые испытания всех обращённых к плазме компонентов дивертора ИТЭР. Испытания интенсивными тепловыми потоками являют собой создаваемую потоком электронов, разгоняемых электронно-лучевой системой стенда, термодинамическую нагрузку, которой подвергаются расположенные в вакуумной камере стенда объекты испытаний. Попеременные циклы нагрева и охлаждения конкретных участков объекта испытаний под действием данных нагрузок приводят к постепенному износу его облицовочного материала. Дальнейшее изучение образовавшихся в ходе испытаний дефектов позволяет определить верность выбранных технологий производства обращённых к плазме компонентов. За 10 лет работы (на момент начала 2020 г.) на стенде IDTF проведено порядка 20 основных кампаний по тепловым испытаниям маломасштабных макетов и полномасштабных прототипов обращённых к плазме компонентов дивертора ИТЭР. Следующим большим этапом работы стенда должны стать серийные испытания элементов дивертора, которые состоятся также в рамках проекта ИТЭР.

**Ключевые слова:** вольфрам, дивертор, испытательная установка, ИТЭР, компоненты дивертора, обращённые к плазме, тепловые испытания.

## TEST FACILITY FOR EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ITER DIVERTOR COMPONENTS BEHAVIOR UNDER HIGH HEAT FLUXES

*A.V. Eremkin, A.V. Volodin, A.I. Kokoulin, A.O. Komarov, V.E. Kuznetsov, A.S. Malyshev, N.B. Stepanov*  
*JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», Saint Petersburg, Russia*

The paper provides a brief overview of the ITER Divertor Test Facility (IDTF) located at the JSC «НИИЭФА», Saint Petersburg, Russia, describes high heat flux tests of plasma-facing ITER divertor components carried out on the IDTF, explains the divertor role and justifies the choice of tungsten as a material for the divertor armor. The IDTF is a unique test facility in Russia intended for high heat flux tests of all plasma-facing ITER divertor components. High heat flux tests are carried out in the mode of thermal cycling load produced by a flow of electrons accelerated by the electron-beam system of the test facility. As a result, the test objects placed in the IDTF vacuum chamber are exposed to this load. Armor material of test objects gradually wears out, when being exposed to alternating cycles of heating and cooling of its particular parts. Further investigation of defects formed by the tests will make it possible to define the validity of the technology chosen for production of the plasma-facing components. For ten years of operation (by the beginning of 2020), about 20 main test campaigns have been performed for small-scale mock-ups and full-scale prototypes of the plasma-facing ITER divertor components. The next important step to be realized on the test facility in the framework of the ITER project should be serial tests of the divertor elements.

**Key words:** tungsten, divertor, test facility, ITER, plasma-facing components, high heat flux tests.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-4-5-14

## РОЛЬ ДИВЕРТОРА В ИТЭР

Дивертор является одним из ключевых компонентов ИТЭР. Его функция заключается в том, чтобы:

- отводить тепло, выделяемое в результате D—T-реакции;
- удалять примесные частицы со стенок вакуумной камеры реактора и из плазменного шнура;
- защищать вакуумную камеру и магнитные катушки от нейтронного излучения в местах, где отсутствует бланкет;
- «отлавливать» атомы гелия, которые по причине взаимных столкновений оторвались от основного потока плазмы и пересекли сепаратрису — границу магнитного поля, создаваемую полоидальными и тороидальными катушками реактора. При этом препятствие дрейфа плазмы на стенку обеспечивается винтовой структурой магнитного поля, вращательное преобразование которой создаётся суперпозицией тороидального поля и магнитного поля тока, текущего по плазме.

Как известно, вся облицовка дивертора ИТЭР будет полностью выполнена из вольфрама. Вольфрам — тугоплавкий металл ( $T_{пл.В} = 3422$  °С) с максимальной прочностью межатомной связи. Он обла-

дает низким коэффициентом физического распыления, наибольшей температурой плавления, довольно высокой теплопроводностью, сравнительно низкой активацией, низким накоплением трития [1].

Внутри вакуумной камеры ИТЭР дивертор будет подвержен воздействию ионов дейтерия и трития, продуктов реакции их синтеза — атомов гелия и свободных нейтронов, а также примесных частиц, оседающих на стенках камеры. При срывах плазмы все эти частицы, обладающие высокой энергией, могут разогревать поверхность компонентов, обращённых к плазме (КОП), до экстремально высоких температур. При этом термическая усталость является одним из наиболее важных повреждающих механизмов для КОП из-за большого количества рабочих циклов (несколько тысяч) и ожидаемых поверхностных тепловых нагрузок. Поэтому оценка поведения элементов, из которых состоит КОП, называемых PFU (от англ. plasma facing unit), при циклических тепловых нагрузках имеет важное значение для демонстрации пригодности выбранных технологий.

Идея испытаний интенсивными тепловыми потоками (далее — тепловые испытания) или ННФТ (от англ. high heat flux testing) состоит в том, чтобы смоделировать эту термическую усталость [2].

Атомы гелия, вкпе с нейтронами, являются продуктами реакции синтеза и образуются при взаимодействии дейтерия и трития — топлива реактора. Они сильно нагревают поверхность первой стенки и дивертора.

Данный процесс может быть симитирован в лабораторных условиях с применением электронно-лучевой пушки (ЭЛП), когда в качестве поверхностной тепловой нагрузки используется электронный пучок. В качестве облицовки дивертора при этом выступает объект испытаний (ОИ) — макет или вертикальная мишень. Достигая поверхности ОИ, электроны частично отражаются, частично поглощаются, разогревая поверхность до высоких температур. Данный процесс, повторяющийся циклически (цикл нагрева — цикл охлаждения), называется тепловыми испытаниями. Он вызывает термическую усталость материала облицовки.

Плотность поглощённой мощности ( $\Phi_{abs}$ ), измеряющаяся в МВт/м<sup>2</sup>, является основной величиной, характеризующей ту нагрузку, которая передаётся на КОП реактора упомянутыми «продуктами» D—T-реакции, а также примесными частицами, испаряющимися со стенок камеры, при непосредственном взаимодействии с освободившимися от основной плазмы частицами. Исходя из данных, полученных на основе вычислений, было принято, что проектная нагрузка на первую стенку ИТЭР должна составить до 5 МВт/м<sup>2</sup>, в то время как на дивертор как более нагруженную часть реактора до 10 и в отдельных местах до 20 МВт/м<sup>2</sup> при медленных переходных процессах в плазме длительностью порядка 10 с.

Если посмотреть на дивертор ИТЭР в целом (рис. 1), он будет состоять из двух основных частей: несущей конструкции, выполненной, в основном, из нержавеющей стали, и КОП весом около 700 т. Дивертор состоит из 54 съёмных кассет, каждая из которых содержит несущую конструкцию (тело кассеты) и три компонента, обращённых к плазме. Это так называемые вертикальные мишени (рис. 2) — внешняя (OVT, от англ. outer vertical target) и внутренняя (IVT, от англ. inner vertical target) и элементы центральной сборки дивертора (ЦСД). В свою очередь, ЦСД состоит из купола, внутренней и наружной отражающих мишеней. Мишени расположены на пересечении линий магнитного поля, где частицы высокоэнергетической плазмы



Рис. 1. Дивертор ИТЭР. Вид с сечением

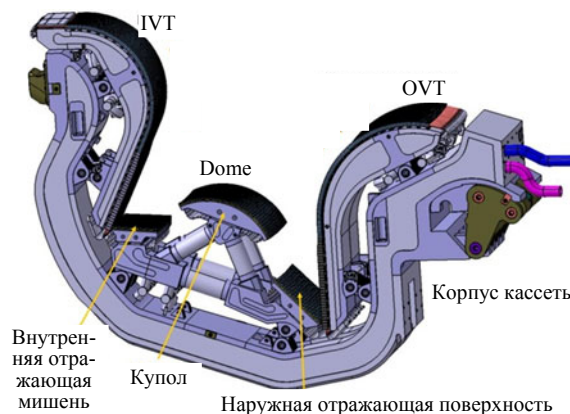


Рис. 2. Кассета дивертора ИТЭР, состоящая из внешней вертикальной мишени (OVT), внутренней вертикальной мишени (IVT) и центральной сборки дивертора (Dome)

ударяются о компоненты. Их кинетическая энергия превращается в тепло. Тепловой поток, получаемый этими компонентами, чрезвычайно интенсивен и требует активного водяного охлаждения [2].

### СТЕНД IDTF

Стенд IDTF (ITER Divertor Test Facility) является крупнейшей в России и одной из крупнейших в мире экспериментальной установкой для проведения термоциклических испытаний КОП дивертора ИТЭР.

Основное назначение стенда IDTF: проведение термоциклических испытаний интенсивными тепловыми потоками внешних и внутренних вертикальных мишеней, а также элементов центральной сборки дивертора.

IDTF включает в себя следующие основные компоненты [3]:

- вакуумная камера и манипулятор;
- система вакуумной откачки;
- электронно-лучевая система;
- контур охлаждения горячей водой высокого давления;
- система охлаждения масок;
- система подготовки и очистки воды;
- система контроля качества воды;
- диагностическое оборудование и система сбора данных.

Рассмотрим некоторые из этих компонентов более подробно.

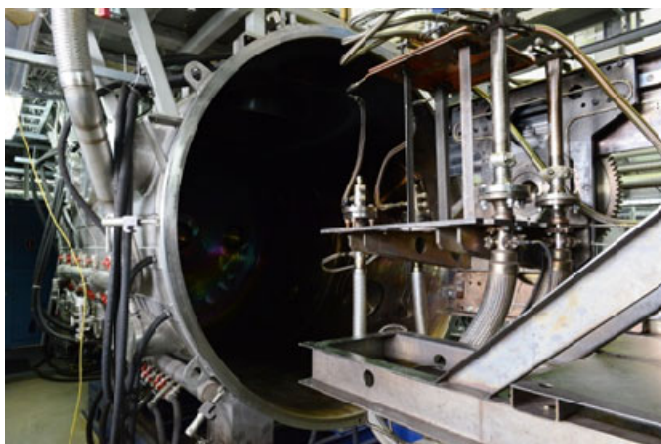


Рис. 3. Вакуумная камера и манипулятор IDTF

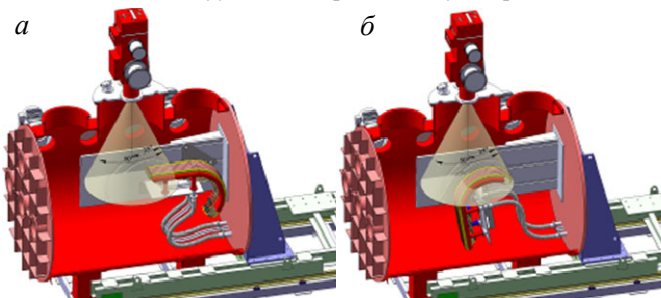


Рис. 4. Объект испытаний внутри вакуумной камеры стенда IDTF, установленный в горизонтальном (а) и вертикальном (б) положении

Компоненты системы:

- высоковольтная система электроснабжения HS800/60;
- электронно-лучевая пушка (ЭЛП) Von Ardenne ® EH800V;
- электронно-лучевая система управления BGS-C1.

Вакуумная камера (рис. 3) предназначена для беспрепятственного прохождения электронного пучка от электронно-лучевой пушки к объекту испытаний, поэтому вакуумная камера и система вакуумной откачки являются основными компонентами IDTF. Размеры вакуумной камеры позволяют проводить испытания компонентов длиной до 2,5 м и шириной 1,5 м. Вакуумная камера оснащена водяным охлаждением. Толщина стенок вакуумной камеры составляет 20 мм, что достаточно для защиты персонала от рентгеновского излучения.

Манипулятор (см. рис. 3) предназначен для позиционирования ОИ внутри вакуумной камеры под ЭЛП. В ходе испытаний ОИ, имеющие кривизну в профиле облицовки, такие как внешние и внутренние вертикальные мишени, а также купол (см. рис. 2), необходимо поворачивать, чтобы обеспечить тепловые испытания всех запланированных позиций. Манипулятор позволяет вращать ОИ (рис. 4, а, б), выставляя их с точностью порядка  $\pm 1,0$  мм.

Электронно-лучевая система (ЭЛС) необходима для того, чтобы производить тепловую нагрузку на ОИ.



Рис. 5. Электронно-лучевая пушка Von Ardenne EH800V

ЭЛП EH800V (рис. 5) относится к типу мощных электронных пушек, номинальный диапазон мощности которых составляет 10—800 кВт. Эта электронно-лучевая пушка представляет собой осевую электронную пушку, которая генерирует симметричный вращению электронный луч при пике ускоряющего напряжения 60 кВ и мощности 800 кВт.

Пушка расположена сверху вакуумной камеры и направлена вертикально вниз.

Контур охлаждения (рис. 6) обеспечивает требуемые параметры охлаждающей жидкости (воды) во время тепловых испытаний КОП. Контур делится на первичный и вторичный.

Параметры контура охлаждения:

Мощность охлаждения, МВт . . .	1, при входной температуре хладагента $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
Мощность насосов, кВт . . .	$\approx 65$
Хладагент . . .	Деионизованная вода
Температура хладагента, $^{\circ}\text{C}$ . . .	20—150
Расход, м <sup>3</sup> /ч . . .	36
Входное давление (max), МПа . . .	6,3
Максимальный напор, МПа . . .	1,8

Система сбора данных (ССД) необходима для преобразования и записи сигналов от всех диагностических устройств испытательного стенда IDTF. ССД обеспечивает одновременное отображение и запись входящих данных с частотой 0,1—10 Гц (за цикл для всех каналов).

Управляющая программа разработана в среде графического программирования National Instruments Labview ®. Данные записываются в формате ANSI. Диапазон длительности цикла записи составляет 1—30 000 с.

Большинство диагностических устройств (рентгеновские датчики, инфракрасная камера, пирометры и видеокамеры) установлены на верхнем фланце вакуумной камеры.

Диагностические устройства ССД обеспечивают измерение следующих параметров:

- уровень вакуума в вакуумной камере;
- длительность и время импульса тепловой нагрузки;
- количество циклов тепловой нагрузки;
- распределение теплового потока с помощью рентгеновской матрицы [4];
- тепловой поток при начальном, промежуточном и конечном скрининге;
- общий поглощённый тепловой поток;
- распределение температуры поверхности объекта контроля (по инфракрасной камере и пирометрам);
- температура и давление хладагента на входе и выходе;
- расход хладагента;
- мониторинг состояния ОИ (видеоинформация).



Рис. 6. Система водяного охлаждения высокого давления и система мониторинга параметров воды

Пульты управления IDTF, где осуществляется мониторинг информации от ССД, управление всеми удалёнными системами стенда и ведётся контроль за ходом термоциклических испытаний, показана на рис. 7.

### ИСПЫТАНИЯ ИНТЕНСИВНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Целью тепловых испытаний является экспериментальное исследование проектных и инженерных решений, выбранных для изготовления диверторно-плазменных компонентов ИТЭР.

Далее при изучении повреждений, вызванных поверхностными тепловыми нагрузками, включая нагрузки с короткими импульсами (тепловой удар, плавление, испарение и т.д.), должны быть исследованы пределы компонентов и определён срок службы многослойных структур с высокими градиентами температуры, подвергающихся термомеханическим циклическим нагрузкам [2].

Начиная с запуска стенда IDTF в эксплуатацию в 2009 г., ежегодно на нём проходит множество тестовых кампаний ННФТ, в которых задействованы различные объекты испытаний (макеты и полномасштабные прототипы), имитирующие облицовку дивертора. В общих чертах макет представляет собой трубку (как правило, бронзовую), на которую с определённым зазором (0,5—1 мм) напаяны моноблоки из вольфрама. Такие макеты, состоящие из одного PFU и имеющие всего от 5 до 20 моноблоков, называются маломасштабными (рис. 8). Они необходимы для оценки изменений, возникающих в макете в ходе проведения тепловых испытаний, оценки его структурной целостности и нахождения возникших в нём дефектов. Таким образом, основным предназначением маломасштабных макетов является отработка технологий изготовления. Это позволит получить наиболее устойчивую к воздействию потока частиц конструкцию облицовки дивертора.

С 2012 г. для проведения тепловых испытаний на стенд IDTF поставляются полномасштабные прототипы (рис. 9) от участников проекта, занятых изготовлением элементов дивертора, — это домашние агентства Европейского Союза, Японии и Российской Федерации.

По условиям соглашения о поставках РА 1.7.P2D.RF ЦСД должна быть поставлена Россией. Полномасштабные прототипы элементов ЦСД также проходят тепловые испытания на стенде IDTF. Один из таких элементов — испытательная сборка полномасштабных прототипов КОП внутренних отражающих мишеней показана на рис. 10.



Рис. 7. Пульты управления IDTF

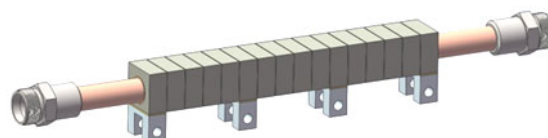


Рис. 8. Маломасштабный макет (3D-визуализация)

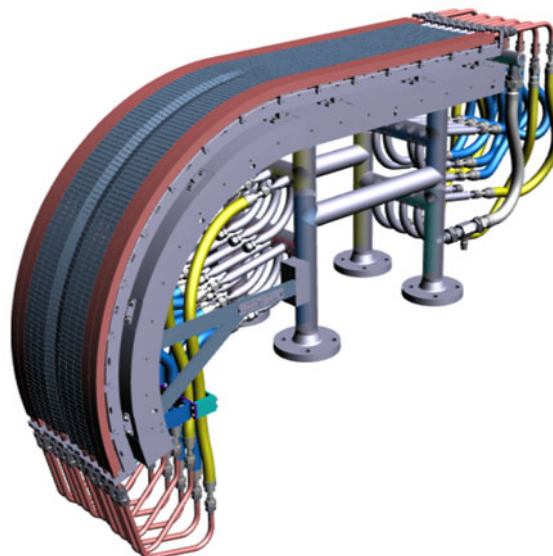


Рис. 9. Полномасштабный прототип OVT (3D-визуализация)

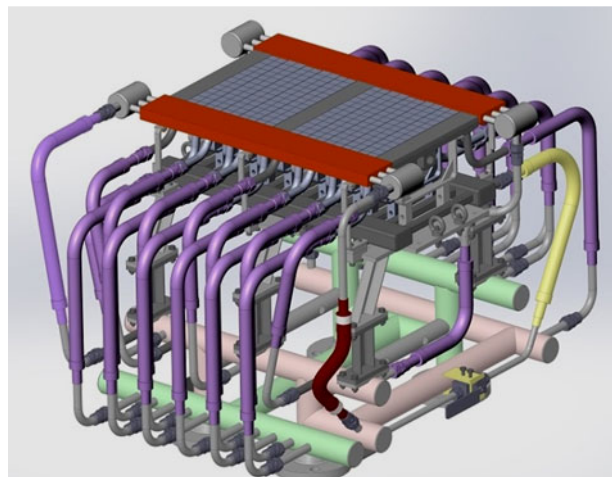


Рис. 10. Полномасштабный прототип КОП внутренних отражающих мишеней (3D-визуализация)

Как и с маломасштабными макетами, производство и дальнейшие тесты полномасштабных прототипов имеют цель подобрать оптимальную технологию производства будущих компонентов дивертора ИТЭР, но уже в больших масштабах и с более сложной геометрией PFU.

Полномасштабный прототип внутренней или внешней вертикальной мишени представляет собой макет половины КОП в масштабе 1:1, точно повторяющий конфигурацию вольфрамовой облицовки будущих КОП дивертора. Полномасштабный прототип содержит 6—8 PFU. Внешняя вертикальная мишень состоит из 138 моноблоков, внутренняя мишень состоит из 146 моноблоков. При этом крайние PFU (они называются dummy) обычно изготавливаются из медных труб прямоугольного сечения и выполняют роль границы зоны испытаний.

В зависимости от требований ИТЭР различные кампании полномасштабных прототипов могут различаться по длительности, количеству импульсов и тепловой нагрузке, например:

- 5000 циклов (10/10 с), 5 МВт/м<sup>2</sup>;
- 5000 циклов (10/10 с), 10 МВт/м<sup>2</sup>;
- 1000 циклов (10/10 с), 20 МВт/м<sup>2</sup>.

Параметры тепловой нагрузки для разных типов ОИ приведены в табл. 1 [2].

Таблица 1. Параметры тепловой нагрузки

Тип ОИ	Материал облицовки	Проектная тепловая нагрузка, МВт/м <sup>2</sup>	Длительность цикла, с
IVT/OVT	W	5; 10; 20	10/10
Dome	W	5; 10	10/10; 2/8*

\*2 с — импульс, 8 с — пауза.

В ходе термоциклических испытаний воздействию теплового потока подвергается не весь прототип, а поочерёдно, в несколько этапов, отдельные зоны. Это сделано для того, чтобы ЭЛС была способна покрыть поверхность прототипа тепловым потоком с заданным значением  $\Phi_{abs}$ . Пример такого разделения на различные зоны испытаний показан на рис. 11.

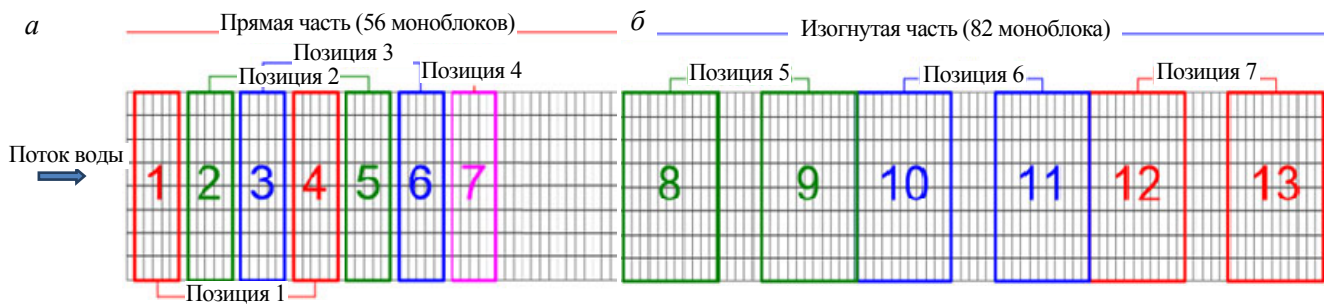


Рис. 11. Испытательные зоны полномасштабного прототипа IVT: прямая часть (а) и изогнутая часть (б)

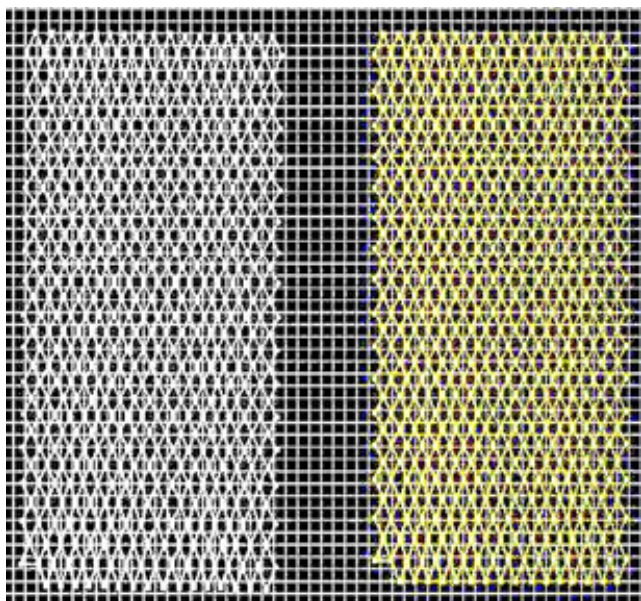


Рис. 12. Растр испытательных зон

Для того чтобы обеспечить необходимый уровень  $\Phi_{abs}$ , необходимо произвести расчёты и подобрать оптимальные параметры — мощность ЭЛП, размеры зон испытаний, а также настроить растр (рис. 12) — траектория, по которой отклоняющая система ЭЛП будет проводить электронный пучок.

После установки ОИ на манипуляторе IDTF к прототипу и маскам подаётся охлаждающая жидкость — деионизированная вода под давлением. Параметры охлаждения при испытаниях компонентов дивертора указаны в табл. 2 [2]. Охлаждающая вода подаётся как в первичный контур — для охлаждения PFU, так и во вторичный — для охлаждения dummy и масок — вспомогательных элементов, необходимых для ограничения испытательных зон. Затем, если все соединения надёж-

Т а б л и ц а 2. Параметры охлаждения при ННФТ

Тип ОИ	Давление на входе, МПа	Температура на входе, °С	Расход, л/с
IVT/OVT	3,9	70	11
Dome	3,9	70	5

ны и течей не обнаружено, манипулятор с помощью специального приводного механизма перемещается внутрь вакуумной камеры и происходит откачка вакуума до давления порядка  $5 \cdot 10^{-4}$  мбар.

Цикл испытаний состоит из двух последовательных импульсов нагрузки по двум зонам одной позиции. Например, цикл в позиции 1 (см. рис. 11) состоит из 10-секундного импульса в зоне 1 и точно такого же импульса в зоне 4. Таким образом, длительность цикла составляет 20 с.

График на рис. 13 показывает изменение температуры поверхности двух моноблоков из разных зон в течение нескольких импульсов. Как видно на графике, температура стремительно вырастает в течение первых 2—3 с, затем набор температуры становится более плавным и, наконец, достигает своего предела к концу импульса. На конкретно взятом примере максимальная температура поверхности вольфрамового моноблока составляет 2000—2050 °С при  $\Phi_{abs}$  20 МВт/м<sup>2</sup>.

Если взглянуть на распределение  $\Phi_{abs}$  в зависимости от времени (рис. 14) для тех же циклов, будет видно, что мгновенное значение  $\Phi_{abs}$  (чёрная линия на графике) несколько колеблется. Это связано с изменением температуры охлаждающей жидкости внутри ОИ. Что касается среднего плавающего значения  $\Phi_{abs}$  moving average (красная линия), то именно оно и должно составлять указанные в протоколе испытаний проектные нагрузки 5, 10 или 20 МВт/м<sup>2</sup>. При этом допускается отклонение в 10% (зелёные линии).

$\Phi_{abs}$  может быть вычислена следующим образом:  $\Phi_{abs} = P_{abs}/S$ , МВт/м<sup>2</sup>, где  $P_{abs}$  — поглощённая мощность;  $S$  — площадь нагружаемой зоны.

Как видно из формулы, мгновенное значение  $\Phi_{abs}$  зависит от поглощённой мощности, которая, в свою очередь, вычисляется по следующей формуле:  $P_{abs} = Qc\Delta T$ , кВт, где  $Q$  — массовый расход охлаждающей жидкости;  $c$  — удельная теплоёмкость охлаждающей жидкости;  $\Delta T = T_{out} - T_{in}$ , °С, где  $T_{out}$  — температура охлаждающей жидкости на выходе из ОИ;  $T_{in}$  — температура охлаждающей жидкости на входе в ОИ.

Помимо температуры, измеренной пирометрами в отдельных точках ОИ, что даёт некое общее представление о температуре поверхности ОИ (как это показано на рис. 14), запись температуры поверхности ведётся и с помощью ИК-камеры раз в 50 или раз в 100 импульсов. Данный метод не даёт сведений о температуре в режиме онлайн, но он оказывается весьма полезен при обработке результатов, так как позволяет оценить температуру поверхности каждого отдельно взятого моноблока.

В итоге ССД позволяет построить зависимость средних температур поверхности моноблоков от номера цикла и в целом оценить изменение температуры облицовки ОИ во времени.

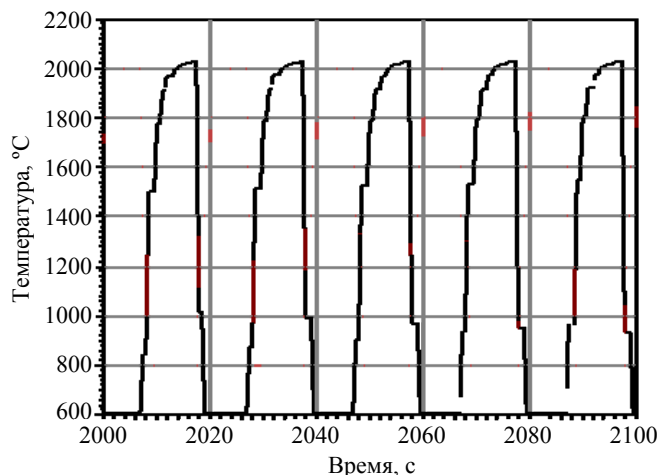


Рис. 13. График зависимости показаний температуры, измеренной пирометрами (— 1, — 2), от времени

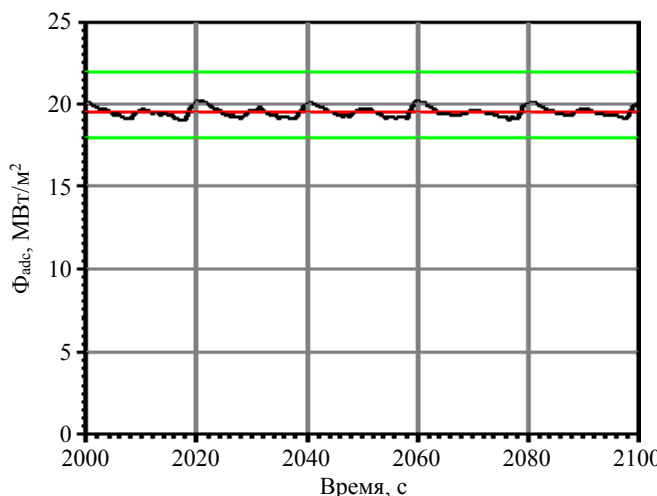


Рис. 14. Распределение мгновенного (—) и среднего (—) значения  $\Phi_{abs}$  во времени

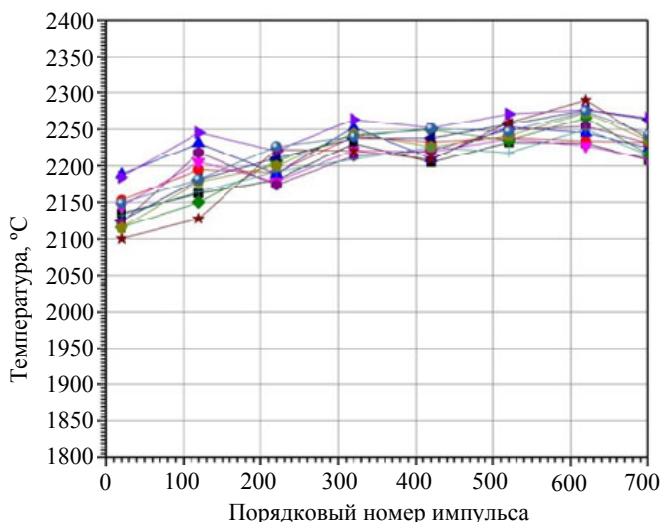


Рис. 15. Измеренные ИК-камерой средние температуры поверхности моноблоков при ННФТ 20 МВт/м<sup>2</sup>: 12 кривых соответствуют 12 моноблокам, на которых измерялась средняя температура

На рис. 15 показано изменение средней температуры поверхности моноблоков, измеренной ИК-камерой, при 20 МВт/м<sup>2</sup>. По большей части такой вид кривой (постепенное нарастание температуры) связан с изменением излучательной способности из-за деградации поверхности [5].

Изменение температуры поверхности в выбранном диапазоне можно наблюдать и на самих ИК-изображениях. Рис. 16 даёт представление о визуальном изменении ИК-изображения в начале и в конце цикла ННФТ 20 МВт/м<sup>2</sup>.

Необходимо добавить, что термоциклические испытания с такой нагрузкой являются наиболее разрушительными из всех тепловых испытаний с проектной тепловой нагрузкой, проводимых для полномасштабных прототипов дивертора ИТЭР, и вызывают наибольшую деградацию поверхности моноблоков. На рис. 17 показан вид моноблоков до и после тепловых испытаний.

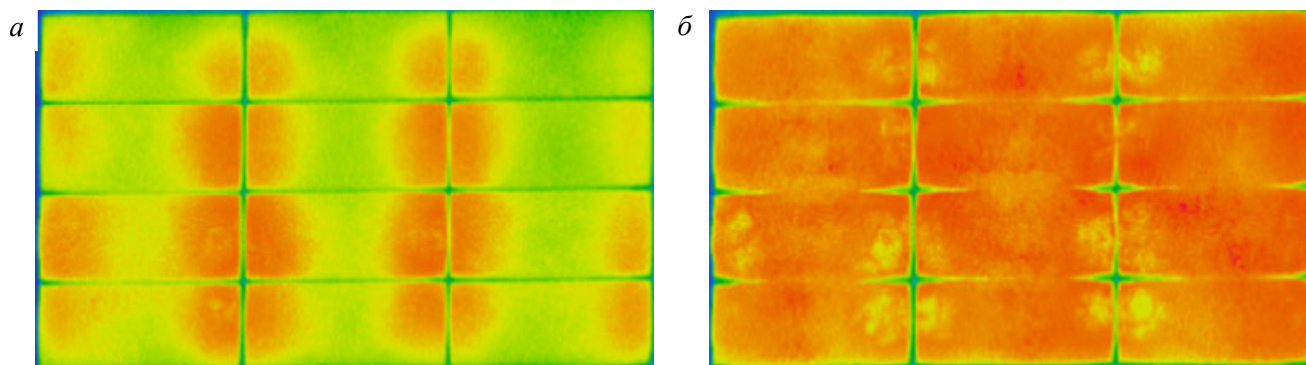


Рис. 16. Изображения с ИК-камеры: ННФТ 20 МВт/м<sup>2</sup>; цикл 120 (а) и 620 (б) (видна деградация поверхности)

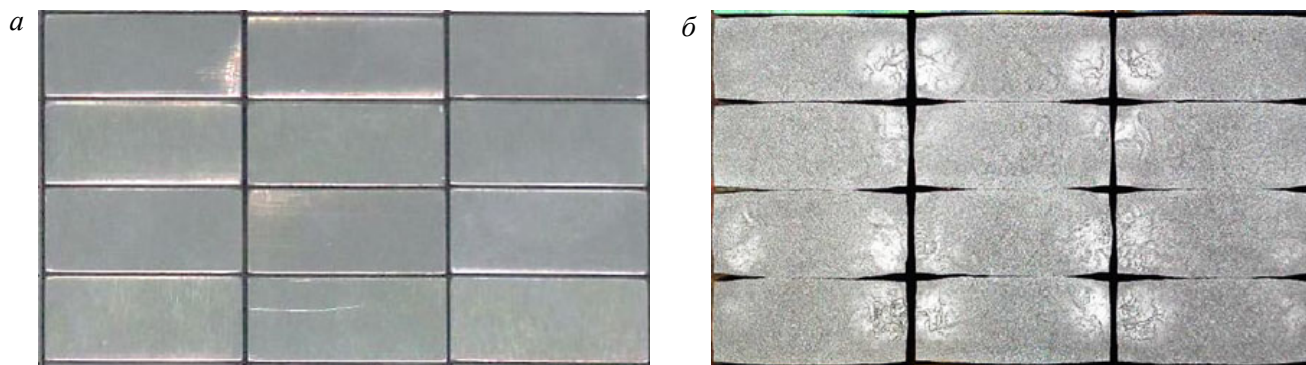


Рис. 17. Фотографии поверхности вольфрамовой облицовки до (а) и после (б) ННФТ-кампании

Конечно, подобные условия необходимы, в первую очередь, для оценки «жизнеспособности» выбранного материала облицовки и разработки технологий, по которым будут изготавливаться реальные КОП дивертора ИТЭР. Дальнейшие тесты (неразрушающий контроль), такие как ультразвуковой анализ, визуальный осмотр с помощью эндоскопа, проверка геометрии и размеров, произведённые после завершения ННФТ-кампании, позволяют определить характер дефектов, образовавшихся в ходе тепловых испытаний. Эти данные, а также данные, полученные в ходе ННФТ от ССД, помогают определить, какие PFU прошли испытания, а какие нет, разобраться в причинах отбраковки и сделать выводы, которые позволят улучшить технологию производства КОП дивертора с вольфрамовой облицовкой.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период с 2009 по 2019 г. на стенде IDTF прошли следующие основные испытания, которые являются частью соглашения о поставках PA 1.7.P2D.RF:

- квалификация стенда IDTF на имитаторе полномасштабного прототипа внешней (OVT) вертикальной мишени дивертора;
- квалификация стенда IDTF на имитаторе полномасштабного прототипа внутренней вертикальной мишени (IVT) дивертора;
- тепловые испытания первого и второго полномасштабных прототипов внешней вертикальной мишени (OVT) с двухкомпонентной облицовкой (W-CFC) (поставщик JA DA);
- тепловые испытания третьего полномасштабного прототипа внешней вертикальной мишени (OVT) с полностью вольфрамовой облицовкой (поставщик JA DA);
- тепловые испытания первого полномасштабного прототипа внутренней вертикальной мишени (IVT) с полностью вольфрамовой облицовкой (поставщик ITER Organisatio);
- тепловые испытания полномасштабного прототипа КОП внутренних отражающих мишеней ЦСД;
- тепловые испытания полномасштабного прототипа КОП наружных отражающих мишеней ЦСД;
- тепловые испытания полномасштабного прототипа КОП купола ЦСД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маханьков А.Н.** Вольфрамовая облицовка диверторной мишени для термоядерного реактора токамак. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., 2003, с. 6—62.
2. **Kuznetsov V. et al.** Status of the IDTF high-heat-flux test facility. — *Fusion Engineering and Design*, 2014, vol. 89, p. 955—959.
3. **Володин А.В., Кузнецов В.Е., Давыдов В.М. и др.** Стенды тепловых испытаний в Открытом акционерном обществе «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова». — *ВАНТ. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*, 2014, вып. 4, с. 67—74.
4. **Kuznetsov V. et al.** X-ray imaging diagnostic in the high heat flux test facilities. — *Original Research Article Fusion Engineering and Design*, 2019, p. 148.
5. **Riccardi B. et al.** Progress of the EU activities for the ITER divertor inner vertical target procurement. — *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 146, p. 1524—1527.



Андрей Викторович Еремкин, ведущий инженер; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия  
eremkin@sintez.niefa.spb.su



Андрей Владимирович Володин, ведущий инженер; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия



Алексей Иванович Кокоулин, ведущий инженер; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия



Антон Олегович Комаров, главный специалист проекта по тепловым испытаниям; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия



Владимир Евгеньевич Кузнецов, начальник лаборатории тепловых испытаний; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия



Алексей Сергеевич Малышев, инженер 2-й категории; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия



Николай Борисович Степанов, ведущий инженер; АО «НИИЭФА», 196641 Санкт-Петербург, дорога на Металлострой 3, Россия

Статья поступила в редакцию 8 июня 2020 г.

После доработки 7 июля 2020 г.

Принята к публикации 24 сентября 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 5—14.