

УДК 621.039.6

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИШЕНИ ДИВЕРТОРА ПРИ ИМИТИРОВАНИИ КАЧЕНИЯ СЕПАРАТРИСЫ

*Р.В. Рулёв, И.В. Мазуль, П.Ю. Пискарёв, В.Е. Кузнецов, В.В. Левичев,
М.С. Колесник, В.В. Рузанов, В.Н. Танчук*

АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена проблема высоких тепловых нагрузок на дивертор реактора токамака, затрудняющих создание работоспособной диверторной мишени, имеющей продолжительный срок службы. Обозначены возможные варианты повышения допустимой тепловой нагрузки, приходящейся на теплоотводящие высоконагруженные элементы дивертора. Для проверки работоспособности одного из подходов были подготовлены и проведены тепловые испытания макета на стенде «Цефей-М». Представлены тепловые расчёты, проведённые перед тепловыми испытаниями, и результаты самих испытаний для возможности качественного сравнения. Исследованный метод показал свою эффективность, что может позволить повысить возможные тепловые нагрузки на дивертор до 30 МВт/м² и выше.

Ключевые слова: дивертор, качание сепаратрисы, обращённый к плазме материал, вольфрам, термоциклические испытания.

HEAT FLUX TESTS OF THE DIVERTOR VERTICAL TARGET WHEN SIMULATING SEPARATRIX SWEEPING

*R.V. Rulev, I.V. Mazul, P.Yu. Piskarev, V.E. Kuznetsov, V.V. Levichev,
M.S. Kolesnik, V.V. Ruzanov, V.N. Tanchuk*

JSC «NIEFA» (Efremov Institute), Saint-Petersburg, Russia

The problem of high heat fluxes on the reactor tokamak divertor target which make very difficult creation of reliable divertor target with sufficient lifetime is considered. Possible solutions to these disadvantages are indicated to increase the permissible thermal load on the heat sink high-loaded divertor elements. To verify the operability of one of the approaches, thermal tests of the mock up were prepared and performed at the Tsefey-M facility. Thermal calculations performed before thermal tests and the results of the tests themselves are presented for the possibility of qualitative comparison. The investigated method has shown its effectiveness, which can increase the possible thermal loads on the divertor to 30 MW/m² and above.

Key words: divertor, separatrix sweeping, plasma-facing material, tungsten, thermocyclic tests.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-3-68-78

ВВЕДЕНИЕ

Диверторное устройство реактора-токамака служит для отвода из разрядной камеры значительной части энергии, используемой для нагрева плазмы, тем самым снижая тепловую и эрозионную нагрузку на первую стенку камеры, чтобы обеспечить неограниченный ресурс работы последней. Кроме того, дивертор способствует защите от поступления в плазму и её очистке от примесей в виде продуктов термоядерной реакции, эрозии стенок и остаточных газов, обеспечивает оптимальную циркуляцию прореагировавшей топливной смеси. При снижении нагрузки на первую стенку увеличивается нагрузка (особенно плотность тепловых и корпускулярных потоков) на диверторную мишень, на которой площадь контакта плазмы со стенкой в силу топологии магнитных полей диверторной конфигурации существенно меньше, чем на первой стенке. Таким образом, диверторная мишень подвергается наиболее разрушительному воздействию плазмы среди всех внутрикамерных компонентов, обращённых к ней, и поэтому во всех проектах реакторов токамаков предполагается плановая замена элементов дивертора по мере исчерпания своего ресурса.

Традиционная мишень дивертора для токамаков реакторного класса (как, например, ИТЭР [1] или ДЕМО [2]) представляет собой многослойную охлаждаемую водой конструкцию, в которой различные слои выполнены из различных материалов и выполняют определённые функции. Средний слой мишени выступает в роли теплоотводящей структуры, имеет каналы охлаждения и выполнен из материалов на медной основе. Теплоотводящая структура облицована защитными плитками из материалов, имеющих

высокую стойкость к ионной и тепловой эрозии и обладающих также высокой теплопроводностью. При выборе толщины облицовки (обычно не менее 5—10 мм) одними из критериев являются недопущение оплавления охлаждаемой подложки при аномальных переходных плазменных нагрузках и обеспечение значительного эрозионного ресурса мишени. Тыльный слой мишени выполнен из нержавеющей стали и ответственен за подачу и отвод теплоносителя к теплоотводящей структуре, обеспечение геометрической стабильности, транспортабельности при замене и прочности мишени в целом, особенно под действием электромагнитных нагрузок. Для удобства извлечения/замены диверторной мишени через патрубки ограниченного сечения она выполняется в виде отдельных секций/кассет, для извлечения которых требуются сложные операции по дистанционному отсоединению (сварочные работы) трубопроводов с теплоносителем и перемещению соседних секций. В проекте ИТЭР продолжительность замены одной (из 54) повреждённой секции дивертора оценивается в несколько месяцев, а замена всей мишени занимает около двух лет. Стоимость всей диверторной мишени ИТЭР составляет более 500 млн долларов, а для реакторов последующих поколений проблема ограниченного срока службы дивертора и его замены может стать критической для их технико-экономических перспектив.

Ограничение ресурса работы диверторной мишени связано, помимо эрозионного износа облицовки, с усталостным разрушением тепловоспринимающих слоёв мишени (облицовка + теплоотводящая структура) под действием значительных температурных напряжений, пропорциональных величине поверхностной тепловой нагрузки, создаваемой плазмой. Тепловые нагрузки в краевой плазме, выносимой в дивертор, в стационарном режиме могут достигать очень высоких значений (≥ 100 МВт/м²) [3], которым не способна противостоять ни одна конструкция. Для снижения этих нагрузок и увеличения тепловоспринимающей поверхности мишени в последние десятилетия в мире были предприняты значительные усилия. Эксперименты на токамаках и расчёты показали, что расширение магнитных силовых линий, увеличение их длины, использование режима газовой мишени с высокой плотностью в диверторе, включая напуск примесных газов, делают возможным снижение пиковой тепловой нагрузки и температуры плазмы [4]. В режиме излучающей газовой мишени, продемонстрированном на действующих токамаках, удастся снизить пиковую тепловую нагрузку на диверторную мишень до приемлемого уровня 5—10 МВт/м², теплосъём которой не представляет большой проблемы и может быть выполнен даже неподвижной мишенью и даже в теплоаккумулирующем режиме. В ИТЭР, в котором в краевой плазме плотность выносимой энергии существенно больше, проектные значения тепловой нагрузки на дивертор повышены до 10—20 МВт/м². Опыт НИОКР по созданию работоспособной мишени для таких нагрузок показал, что они близки к предельно допустимым для неподвижных твердотельных водоохлаждаемых конструкций. Однако достижимость режима газового дивертора в энергонагруженных токамаках реакторного класса пока не продемонстрирована. Создание очень плотной газовой мишени противоречит условиям удержания основной плазмы [3, 4], а расчёты показывают, что если газовая мишень окажется недостаточно плотной и эффективной, то пиковая нагрузка на дивертор может достигать 30—40 МВт/м² для ИТЭР [5] и даже выше для реакторов типа ДЕМО. Поиск возможности увеличения ресурса работы обращённых к плазме элементов дивертора в условиях повышенных тепловых нагрузок является одним из ключевых вопросов в развитии термоядерных установок будущего.

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ДИВЕРТОРЕ ТРТ

Проект отечественного токамака реакторных технологий (ТРТ) [6], в частности, нацелен решать обозначенную задачу. Предварительные расчёты значения пиковой нагрузки на диверторную мишень, выполненные А.С. Кукушкиным с коллегами [7], показали, что при максимальной проектной мощности дополнительного нагрева плазмы ТРТ 40 МВт и инъекции примесей, способствующих формированию газовой мишени, получить нагрузку менее 20—25 МВт/м² не удастся. Более того, даже при пониженной мощности дополнительного нагрева, используемой на первоначальной фазе работы ТРТ, снижение нагрузки до приемлемых для конструкции 10—15 МВт/м² также в настоящее время не гарантировано. Эта

ситуация объяснима, так как изначально проект ТРТ нацелен за счёт высоких проектных значений мощности дополнительного нагрева и магнитного поля на получение и изучение режимов высокой, как в ИТЭР и даже в ДЕМО, энергонагруженности всех компонентов, обращённых к плазме (КОП), включая дивертор. В таких условиях необходимо принять дополнительные меры для обеспечения выполнения программы установки в случае, если не удастся реализовать всех преимуществ режима газовой мишени и пиковая нагрузка на диверторную мишень превысит 15 МВт/м^2 .

В АО «НИИЭФА» в рамках проекта КОП [8, 9] токамака ТРТ разрабатывается подход к увеличению ресурса работы вертикальных мишеней дивертора за счёт распределения выносимой в дивертор мощности по большей площади, тем самым снижая эффективную плотность мощности тепловой нагрузки.

Для реализации распределения теплового потока вдоль мишени рассматривается несколько вариантов. Первый вариант заключается в качании сепаратрисы за счёт использования дополнительных встроенных в диверторную камеру катушек полоидального поля, которые позволят сдвигать пик тепловой нагрузки вдоль высоты вертикальных мишеней, обеспечивая нужные режимы качания.

Вторым вариантом смещения тепловой нагрузки вдоль элементов дивертора рассматривается возможность механического качания самой мишени. Поскольку качать громоздкую и тяжёлую диверторную мишень целиком (с учётом трубопроводов с теплоносителем) не представляется возможным, в своё время была предложена концепция мишени со сменной облицовкой [10], в которой предлагается качать только облицовочную часть конструкции.

Также рассматривается и вариант комбинации механического перемещения элементов дивертора вместе с качанием сепаратрисы. В этом случае вертикальное перемещение (качание) мишени может производиться при существенно меньших амплитудах и частотах/скоростях, что реализовать механически, по видимому, значительно проще.

Однако снижение эффективной (распределённой по большей площади мишени) тепловой нагрузки приводит к увеличению числа термоциклов, которое зависит от частоты качания мишени/сепаратрисы. Например, для диверторной мишени токамака ТРТ с продолжительностью горения плазмы 100 с качание мишени/сепаратрисы с частотой 1 Гц увеличивает число циклов нагрева облицовки в $100 \text{ с} \times 1 \text{ Гц} = 100$ раз.

Таким образом, целью настоящих исследований стало изучение термоциклической долговечности вольфрамовой облицовки в условиях повышенных тепловых нагрузок и увеличенного количества циклов нагрева и остывания. Необходимость экспериментального изучения обусловлена тем, что возможность получения расчётного ответа на вопрос о допустимом дополнительном термоциклировании вольфрамовой облицовки отсутствует. Данных о малоциклового усталости вольфрама при высоких температурах от температурных напряжений, которые можно было бы использовать при оценке воздействия температурных напряжений, полученных в расчёте, в литературе не существует.

Термоциклические испытания макета диверторной мишени с вольфрамовой облицовкой в режиме, имитирующем качание сепаратрисы/мишени, были проведены на стенде «Цефей-М» [11, 12] в АО «НИИЭФА».

МАКЕТ И ОСНАСТКА

Для проверки работоспособности подхода распределения тепловой нагрузки был изготовлен макет из медной трубы квадратного сечения, где располагались четыре зоны испытания с вольфрамовой облицовкой различного формата.

В каждой зоне облицовка состояла из одной биметаллической плитки размером 24×24 мм и толщиной 10 мм, из которых 8 мм составляла толщина вольфрама, а 2 мм составлял медный подслоя, выполненный методом наплавки. Плитки были дополнительно разрезаны на более малые тайлы на глубину 9 мм для недопущения их растрескивания при тепловых расширениях во время испытаний. Поскольку величина термонапряжений зависит от поперечного размера плитки, для сравнения результатов исследований выбрали два типоразмера малых тайлов с поперечным сече-

нием 6×6 мм и 4×4 мм. Использовался вольфрам марки ВМП (производства АО «Полема»), который одобрен для применения в диверторе проекта ИТЭР.

Чертёж макета показан на рис. 1, а необходимая оснастка для удобства эксперимента — на рис. 2. Нумерация плиток по порядку слева направо.

Для имитации качания сепаратрисы вдоль мишени дивертора выполнялось последовательное возвратно-поступательное перемещение (скачкообразно) тепловой нагрузки от одной плитки к другой.

Каждая из четырёх зон испытаний была ограничена медной оконной маской. Параметры теплоносителя для проведения тепловых испытаний следующие:

Требуемое давление воды на входе макета, МПа . . .	3,2
Требуемая температура воды на входе макета, °С . . .	50
Расход воды через макет, общий, кг/с . . .	1,67 (15 м/с)
Нагружаемая площадь одной зоны, см ² . . .	6,25
Длительность импульса/паузы . . .	Непрерывно
Поперечное сечение водяного канала, мм ² . . .	113

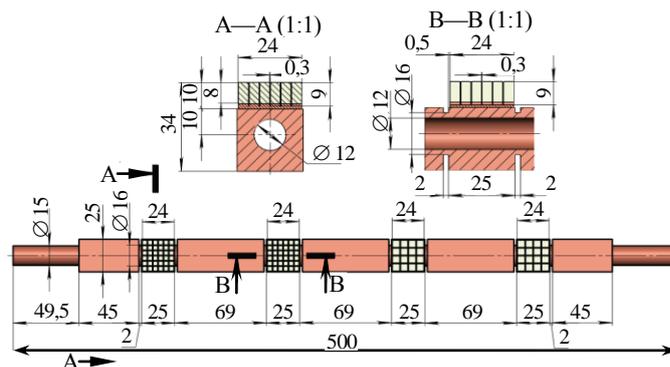


Рис. 1. Макет диверторной мишени для проведения циклических тепловых испытаний, имитирующих режимы качающегося дивертора

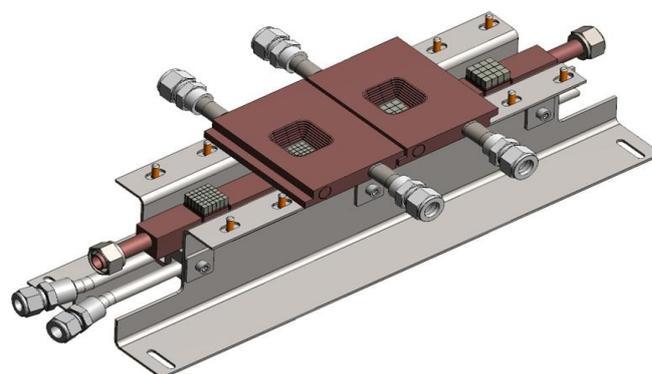


Рис. 2. Оснастка для тепловых испытаний (крайние маски убраны для наглядности)

СТЕНД «ЦЕФЕЙ-М»

Схема проведения тепловых испытаний на стенде «Цефей-М» [13] показана на рис. 3. На подвижном модуле стенда был смонтирован макет в оснастке. Металлорукавами к макету был подключён контур охлаждения с приведёнными параметрами теплоносителя. Над макетом были установлены четыре медные оконные маски (рис. 4), подключённые к отдельному контуру охлаждения. Макет на подвижном модуле был помещён в вакуумную камеру.

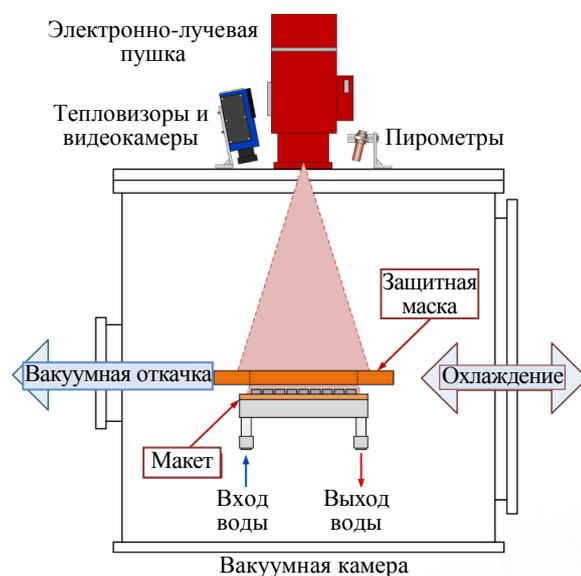


Рис. 3. Схема проведения тепловых испытаний

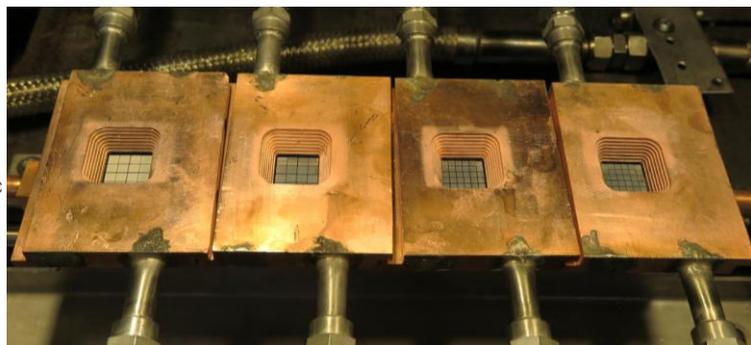


Рис. 4. Макет с установленными защитными масками

В качестве источника тепловой нагрузки на стенде используется электронно-лучевая пушка, позволяющая обеспечивать требуемые нагрузки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЁТЫ

При работе над проектами дивертора различных токамаков для выбора оптимальных режимов качания пика тепловой нагрузки был проведён исчерпывающий расчётный анализ температурного состояния многослойной мишени для различных сочетаний амплитуды смещения пика (в диапазоне $A = \pm 5\text{—}15$ см) и частоты возвратно-поступательных перемещений (в диапазоне $\nu = 0,1\text{—}3$ Гц) [11]. Выбранный диапазон амплитуд качания обусловлен пространственными ограничениями в диверторной камере и высотой вертикальной мишени, которые ограничивают размер максимального отклонения пика от среднего положения значением ~ 15 см. Снизу диапазон ограничен значением 5 см, который сравним с шириной профиля тепловой нагрузки ($h = 3\text{—}10$ см) на наклонной мишени, и смещение пика на меньшую величину слабо увеличивает площадь теплового нагружения. Аналогично с выбором частоты качания при малой скорости смещения пика (низкая частота) воздействие опасной пиковой нагрузки успевает прогреть мишень достаточно глубоко и сформировать неприемлемый градиент температур и нагрев поверхности облицовки. При высокой частоте качания происходит эффективное усреднение пика тепловой нагрузки как в пространстве, так и со временем, но это требует неприемлемо высокой скорости перемещения мишени или сепаратрисы (со скоростью $4 A_{\text{макс}} \times \nu_{\text{макс}} = 4 \times 15 \text{ см} \times 3 \text{ Гц} = 1,8 \text{ м/с}$), которая в условиях внутри токамака приводит к значительным проблемам, в том числе вызванным наведёнными токами. По результатам проведённого анализа была получена необходимая информация для дальнейшей, в том числе экспериментальной отработки этого подхода. В частности было показано, что для целей температурного анализа/испытаний в режиме качания, т.е. в режиме пространственного усреднения, сложный 2D-профиль реальной тепловой нагрузки на мишень может быть заменён на модельный прямоугольный профиль, высота которого соответствует максимуму на профиле реальной нагрузки, а площадь соответствует площади под профилем реальной нагрузки. Это упрощение позволило в эксперименте вместо формирования сложного профиля тепловой нагрузки и его перемещения (взад-вперед) вдоль макета мишени (аналоговый режим) использовать однородный по сечению профиль пучка, который последовательно в режиме нагрузка/пауза направляется на различные участки макета («цифровой» режим). На край макета мишени пик нагрузки приходит реже, но длительность импульса больше (зона разворота пика при возвратно-поступательном движении). В центре мишени нагрузка задерживается меньше (без остановки), но в 2 раза чаще.

Перед проведением тепловых испытаний макета были подготовлены дополнительные тепловые расчёты и смоделированы нагрузки в схожих режимах. Нестационарная задача теплопроводности решалась с использованием пакета ANSYS.

В процессе расчётов были получены данные о тепловом состоянии макетов как для стационарных нагрузок, так и для нестационарных режимов теплового нагружения.

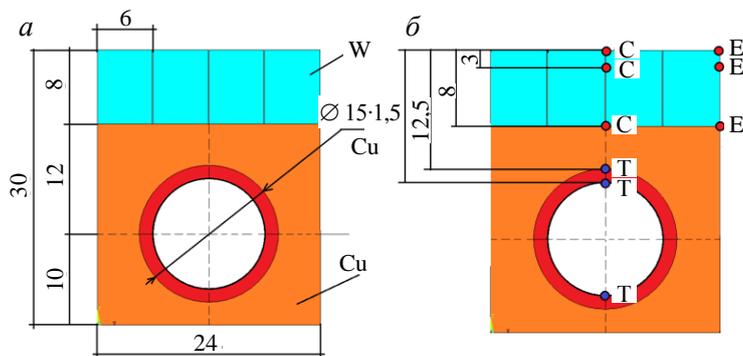


Рис. 5. Модель, характерные размеры (а), материалы, схема вывода результатов для точек (б)

Схема вывода результатов для характерных точек показана на рис. 5, б. Форма импульсов нагружения была принята прямоугольной. При моделировании были учтены кривая кипения и возможность наступления кризиса теплоотдачи на поверхности канала охлаждения. В расчётную модель макета для эффективного перемешивания охлаждающей воды внутрь круглого канала охлаждения макета помещена медная скрученная лента.

Во время проведения тепловых испытаний скрученная лента не была установлена в макет. Для компенсации отсутствия ленты в макете была снижена температура воды на входе и увеличена скорость прокачки.

В расчётах использованы следующие параметры макета и системы охлаждения:

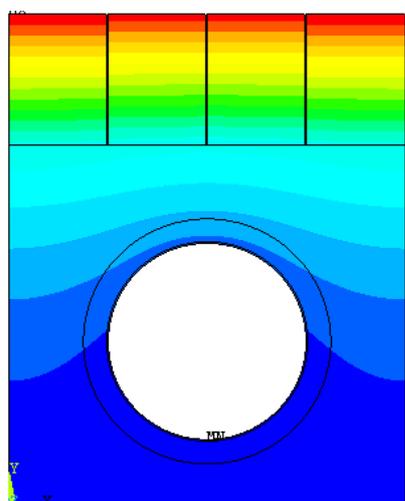
- температура охлаждающей воды $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление $P = 35\text{ атм.}$, скорость $V = 10\text{ м/с}$;
- материалы: облицовка — вольфрам, тело — медь (бронза), трубка охлаждения — медь (бронза).

Результаты теплового расчёта для стационарной нагрузки $q = 20\text{ МВт/м}^2$ представлены в таблице и на рис. 6—9.

Результаты теплового расчёта для $q = 20\text{ МВт/м}^2$

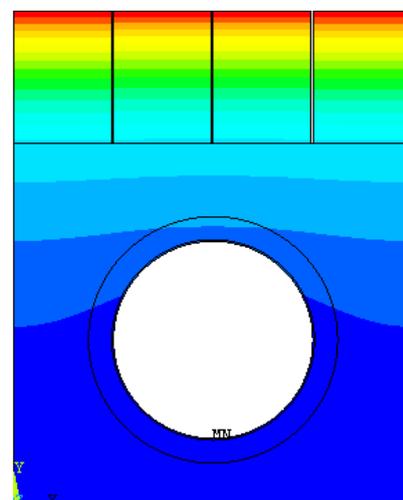
Обозначение точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Обозначение точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$
C1	2042	E1	2081
C2	1553	E2	1593
C3	700	E3	757
T1	427		
T2	317		
T3	136		

Видно, что в отсутствие качания тепловой нагрузки температура вольфрама превышает $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, что существенно выше температуры его рекристаллизации, а максимальная температура медного охлаждаемого основания достигает $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к заметному испарению меди. В таких условиях конструкция работает на пределе, а её срок службы будет небольшим.



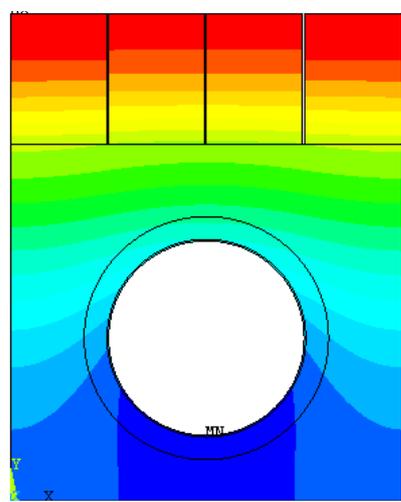
136 352 568 784 1001 1217 1433 1649 1865 2081

Рис. 6. Распределение температуры, стационарная нагрузка $q = 20\text{ МВт/м}^2$



94,6 217,5 340,3 463,2 586,1 709 831,9 954,7 1077,61200,5

Рис. 7. Распределение температуры, импульсная нагрузка 20 МВт/м^2 . Конец импульса



96,6 126,1 155,6 185,2 214,7 244,2 273,8 303,3 332,8 362,4

Рис. 8. Распределение температуры, импульсная нагрузка $q = 20\text{ МВт/м}^2$. Конец паузы

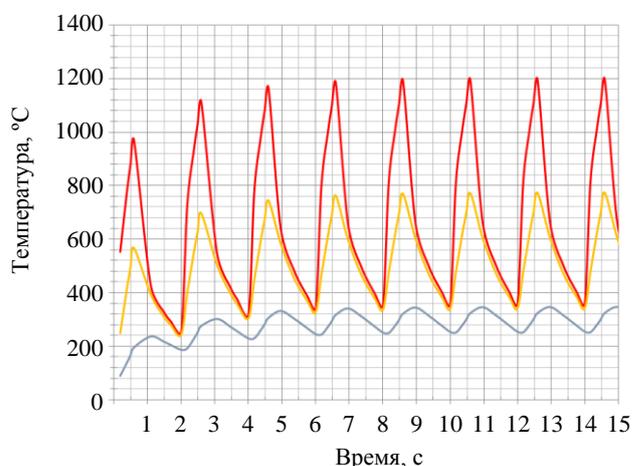


Рис. 9. Изменение температуры, импульсная нагрузка $q = 20\text{ МВт/м}^2$: — C1, — C2, — C3

Во втором варианте расчёта приведено моделирование нестационарной (импульсной) нагрузки с тепловым потоком $q = 20 \text{ МВт/м}^2$, длительностью импульса $t = 0,6 \text{ с}$ и длительностью паузы $t = 1,4 \text{ с}$. Данное соотношение длительности нагрева и паузы охлаждения соответствует реализуемому режиму качания, в котором размах (двойная амплитуда отклонения нагрузки от среднего положения $2 A$) качания превышает ширину прямоугольного пика нагрузки (h) в $2/0,6 = 3,5$ раза, а частота качания составляет $0,5 \text{ Гц}$. Применительно к внешней мишени дивертора ТРТ (расположена на радиусе $R = 2,4 \text{ м}$, воспринимает 15 МВт тепла при $P_{\text{доп. нагрев}} = 30 \text{ МВт}$, пиковая тепловая нагрузка 20 МВт/м^2) этот расчёт будет соответствовать ширине прямоугольного пика $h = 50 \text{ мм}$, амплитуде качания $A = \pm 87,5 \text{ мм}$, средней скорости перемещения пика по мишени не выше $0,175 \text{ м/с}$, что с инженерных позиций представляется вполне достижимым.

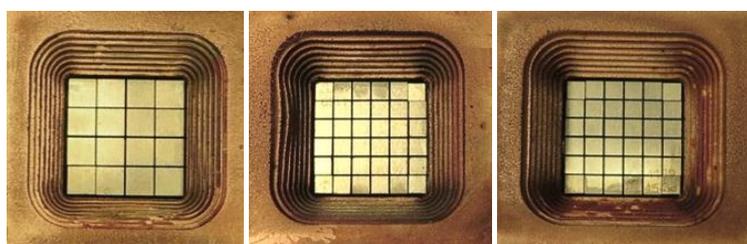
Видно, что в режиме качания тепловой нагрузки максимальные температуры вольфрама и меди снизились почти в 2 раза. Кроме того, амплитуда термоциклов на поверхности вольфрама уменьшилась в $2042/(1200-350) = 2,4$ раза, а на поверхности меди в $700/(350-250) = 7$ раз. Таким образом, расчёты показали, что умеренное качание пикированной нагрузки может существенно снизить максимальные температуры мишени и уменьшить амплитуду изменения температур облицовки.

Каким образом увеличение числа циклов отразится на поведении вольфрама, предстоит определить экспериментально.

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА СТЕНДЕ «ЦЕФЕЙ-М»

Тепловые испытания макета проходили в несколько этапов с различным временем воздействия на плитки и величиной теплового потока.

Предварительный этап испытаний. На данном этапе для настройки требуемой плотности мощности в пучке (определяется калориметрически по нагреву воды при известном размере окна маски и достижении стационарного режима нагрева плитки) и для калибровки измерительной аппаратуры на плитке № 1 (крайняя слева на фото рис. 4) была получена нагрузка 20 МВт/м^2 . Было проведено несколько термоциклов (15 с импульс/15 с пауза) с достижением стационарной температуры поверхности. Измеренная температура совпала с расчётной. Важно отметить, что при данной нагрузке, которая соответствует максимальной нагрузке в диверторе ИТЭР (20 МВт/м^2), не произошло какого-либо повреждения вольфрама или зоны соединения плитки с медным основанием. В отличие от дизайна вертикальной мишени ИТЭР, в которой использовалась геометрия облицовки типа моноблок, в данном случае использовалась геометрия облицовки и границы её соединения с подложкой, называемая термином «макробраш» (или плоские плитки на пьедестале). Данный дизайн облицовки, который значительно удешевляет её изготовление и уменьшает расход вольфрама, был много лет назад предложен в НИИ-ЭФА, показывает рекордную стойкость к тепловым нагрузкам [14] и будет использован в проекте дивертора ТРТ.



Плитка № 2

Плитка № 3

Плитка № 4

Рис. 10. Фотографии поверхности плиток после первого этапа

В результате проведённых испытаний на первом этапе видимых изменений поверхности макета не выявлено, как не выявлено и каких-либо изменений качества теплосъёма.

Пиковые значения температуры плитки № 2, измеренные пирометром, составили $1196 \text{ }^\circ\text{C}$.

Первый этап тепловых испытаний.

На первом этапе тепловых испытаний (рис. 10) нагрев плиток проходил по следующей циклограмме: $0,66$ (плитка № 2) $\rightarrow 0,33$ (№ 3) $\rightarrow 0,66$ (№ 4) $\rightarrow 0,33 \text{ с}$ (№ 3). Тепловой поток составлял 20 МВт/м^2 . Общее количество сделанных циклов (по 2 с каждый) составило $20\,000$.

В данном режиме для плиток № 2 и 4 режим термоциклирования близок к расчётному.

Измеренная в эксперименте максимальная температура плитки № 2 хорошо согласуется с расчётным результатом.

Второй этап тепловых испытаний.

На втором этапе тепловых испытаний (рис. 11) нагрев плиток проходил по другой циклограмме: 0,25 (плитка № 2) → 0,125 (№ 3) → 0,125 с (пауза) → 0,25 (№ 4) → 0,125 (№ 3) → 0,125 с (пауза). Тепловой поток составлял 30 МВт/м². Общее количество сделанных циклов (по 1 с каждый) составило 30 000.

В результате проведённых испытаний на втором этапе происходит матирование поверхности плиток вольфрама, изменений качества теплосъёма макетом не выявлено.

Пиковые значения температуры плитки № 2, измеренные пирометром, составили 1379 °С.

Циклограмма испытаний по сравнению с первым этапом была изменена, так как была заметно (в 1,5 раза) увеличена пиковая нагрузка, что потребовало увеличить «интенсивность» качания, чтобы смягчить последствия увеличения нагрузки. Была увеличена частота качания (1 с вместо 2 с), а также пропорция между общей продолжительностью цикла и длиной импульса (эквивалентно соотношению между двойной амплитудой качания и шириной пика), которая на данном этапе составила величину $1/0,25 = 4$ по сравнению со значением $2/0,66 = 3$ на первом этапе. В результате увеличения «интенсивности» качания при 50%-ном увеличении нагрузки максимальная температура облицовки увеличилась лишь на 15% ($1379\text{ °C}/1196\text{ °C} = 1,15$).

Третий этап тепловых испытаний. На третьем этапе тепловых испытаний нагрев плиток проходил по следующей циклограмме: 0,333 (плитка № 2) → 0,167 (№ 3) → 0,333 (№ 4) → 0,167 с (№ 3). Тепловой поток составлял 30 МВт/м². Общее количество сделанных импульсов (по 1 с каждый) составило 20 000.

В результате проведённых испытаний на третьем этапе происходит матирование поверхности плиток вольфрама, заметны небольшие трещинки на поверхности, изменений качества теплосъёма макетом не выявлено.

Пиковые значения температуры плитки № 3, измеренные пирометром, составили 1481 °С, а плитки № 4 — 1675 °С. Разница температур в данном случае связана с разницей в режимах нагружения. При одинаковой поглощаемой этими плитками за время полного цикла энергии плитка № 3 испытывает более слабые термоциклы, так как работает при более высокой частоте нагружения.

Исследование поверхности после третьего этапа. После завершения третьего этапа было проведено исследование поверхности плиток при помощи оптического микроскопа. Самые явные дефекты по результатам тепловых испытаний показаны на рис. 12.

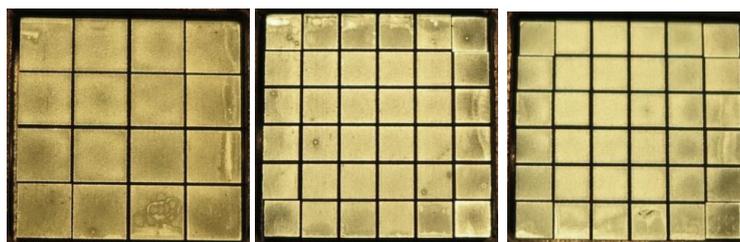


Рис. 11. Фотографии поверхности плиток после второго этапа

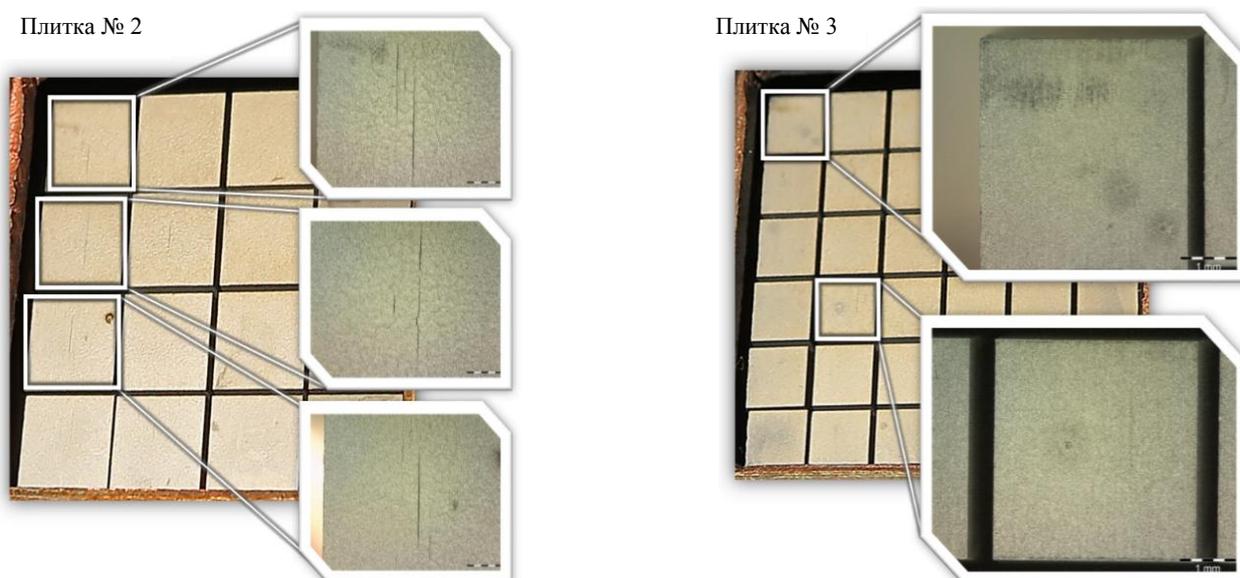


Рис. 12. Результаты исследования поверхности после третьего этапа

Видно, что на плитке № 2 на тайлах с поперечным сечением 6×6 мм после 70 000 циклов (после этапов 1—3) появились усталостные трещины, наличие которых, впрочем, не сказалось на работоспособности конструкции. При последующем термоциклировании на этапах 4 и 5 (дополнительное число термоциклов составило $10 + 65,7 = 75,7$ тысяч) выявленные трещины не получили видимого развития. На плитках с меньшим поперечным размером (4×4 мм) усталостных трещин не заметно.



Плитка № 2

Плитка № 3

Плитка № 4

Рис. 13. Фотографии поверхности плиток после четвёртого этапа

Четвёртый этап тепловых испытаний. Имитация срывов. На четвёртом этапе тепловых испытаний (рис. 13) проходила имитация одновременного воздействия основной квазистационарной тепловой нагрузки (в данном случае в режиме качания) совместно с импульсным воздействием, характерным для переходных тепловых режимов: типа срыв или вертикальное смещение плазмы, воздействие краевых

мод (типа ELM's). Это достигалось путём фокусировки пучка до значений $q \geq 500$ МВт/м² на 10 мс.

Нагрев плиток проходил по следующей циклограмме: 0,25 с (плитка № 2) → фокусировка в точку на 10 мс (плитка № 2) → 0,125 с (№ 3) → фокусировка в точку на 10 мс (№ 3) → 0,105 с (пауза) → 0,25 с (№ 4) → фокусировка в точку на 10 мс (№ 4) → 0,125 с (№ 3) → фокусировка в точку на 10 мс (№ 3) → 0,105 с (пауза). Тепловой поток составлял 30 МВт/м², мощность в пучке 57 кВт. Плотность поглощённой энергии при имитации переходных нагрузок составила не менее $500 \text{ МВт/м}^2 \times 10 \text{ мс} = 5 \text{ МДж/м}^2$. Общее количество сделанных импульсов (по 1 с каждый) составило 10 000.

В результате проведённых испытаний на четвёртом этапе произошло значительное оплавление в зоне фокусировки пучка, изменений качества теплосъёма макетом не выявлено.

Пиковые значения температуры плитки № 4 непосредственно перед фокусировкой пучка составили 1688 °С.

На последнем пятом этапе испытания были проведены при одинаковой тепловой нагрузке 30 МВт/м² и фиксированной циклограмме для получения основного объёма циклов и данных о термоциклической прочности вольфрама в сопоставимых условиях.



Плитка № 2

Плитка № 3

Плитка № 4

Рис. 14. Фотографии поверхности плиток после пятого этапа

Пятый этап тепловых испытаний. На пятом этапе тепловых испытаний (рис. 14) нагрев плиток проходил по следующей циклограмме: 0,25 с (плитка № 2) → 0,125 с (№ 3) → 0,125 с (пауза) → 0,25 с (№ 4) → 0,125 с (№ 3) → 0,125 с (пауза). Тепловой поток составлял 30 МВт/м². Общее количество сделанных импульсов по 1 с составило 65 700.

В результате проведённых испытаний на пятом этапе происходит матирование поверхности плиток вольфрама и зоны оплавления, заметны небольшие трещинки на поверхности, изменений качества теплосъёма макетом не выявлено.

ВЫВОДЫ

В работе продемонстрированы возможности электронно-лучевой установки «Цефей-М» имитировать поверхностные тепловые нагрузки, характерные для большинства режимов работы КОП в токамаках различных поколений. Речь идёт об основных квазистационарных нагрузках, о возможности воспроизводить режимы качания пика тепловой нагрузки, имитации некоторых переходных тепловых нагрузок (срывы плазмы, ELM,s и др.), в том числе одновременного совмещения этих режимов. Имеющееся диагностическое оборудование стенда «Цефей-М» позволяет регистрировать нестационарные тепловые процессы и обеспечивать сравнение расчётных и экспериментальных температурных данных.

Расчётом и экспериментально было показано, что смещение пика тепловой нагрузки вдоль мишени дивертора позволяет эффективно (в разы) снизить максимальную температуру облицовки и амплитуду её изменения при циклировании, а также амплитуду вариации температуры в зоне присоединения облицовки к подложке. Эти изменения температурного режима позволяют существенно снизить температурные напряжения в многослойной мишени и тем самым увеличить её срок службы.

Было продемонстрировано, что использование режима «качания» пика тепловой нагрузки при технически достижимых параметрах (частота 0,5—1 Гц, увеличение площади теплового воздействия в 3—4 раза) позволяет повысить допустимую исходную/падающую тепловую нагрузку на мишень до 30 МВт/м², причём обеспечить при этом температурные условия на мишени даже более благоприятные, чем при нагрузке 20 МВт/м² в режиме, характерном для ИТЭР, и постоянном положении зоны «страйк» на мишени. Экстраполяция полученных результатов на режимы чуть более «интенсивного качания», по нашей оценке, позволит говорить о допустимости пиковой нагрузки на дивертор до значений 35—40 МВт/м², что может позволить в перспективе отказаться от режима газовой мишени, если этого захотят физики плазмы.

Использование частотного режима теплового нагружения приводит к дополнительному числу циклов пусть и меньшей амплитуды. В эксперименте показано (на базе 135 тыс. термоциклов на крайних плитках и 270 тыс. циклов на центральной плитке), что вольфрамовая облицовка выдерживает без серьёзных разрушений дополнительное термоциклирование в режиме качания сепаратрисы. Применительно к токамаку ТРТ, в котором длительность разряда плазмы составляет 100 с, качание сепаратрисы с частотой 1 Гц возможно как минимум на протяжении 1350 разрядов плазмы.

В эксперименте также получило подтверждение ранее известное расчётное положение, что уменьшение характерного размера облицовочной плитки в плане снижает температурные напряжения в плитке и повышает её термоциклическую усталостную прочность. На плитках меньшего сечения (4×4 мм²) усталостные трещины не были обнаружены, а на плитках увеличенного сечения (6×6 мм²) усталостные трещины были обнаружены после 70 тыс. термоциклов, но они при дальнейшем термоциклировании не увеличились в размерах. В практическом плане это позволяет высказать предположение (требует дальнейшей проверки), что при изготовлении диверторной облицовки (для токамака ТРТ, например) можно обойтись изготовлением более крупных облицовочных плиток (например, 10×10 мм², что дешевле), которые по мере эксплуатации в результате поверхностного умеренного растрескивания подвергнутся самосегментации, которая снизит температурные напряжения и позволит дальнейшую эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merola M. et al. Overview and status of ITER internal components. — *Fusion Eng. Des.*, 2014, vol. 89, p. 890-5.
2. Federici G. et al. Overview of EU DEMO design and R&D activity. — *Ibid.*, p. 882-9.
3. Kukushkin A.S., Parker H.D. Neutral recirculation—the key to control of divertor operation. — *Nucl. Fusion*, 2016, vol. 56, p. 126012 (7 p.).
4. Wischmeier M. High density operation for reactor-relevant power exhaust. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 463, p. 22-9.
5. Loarte A. et al. Power and particle fluxes at the plasma edge of ITER: specification and physics basis. — In: 22nd IAEA Fusion Energy Conference. Geneva, 2008, IT/P6-13.
6. Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N., Mazul I.V. et al. Tokamak with Reactor Technologies (TRT): Concept, Missions, Key Distinctive Features and Expected Characteristics. — *Plasma Physics Reports*, 2021, vol. 47(11), p. 1092—1106.
7. Кукушкин А.С., Пшенов А.А. Режимы работы традиционного дивертора в TRT. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 11.
8. Mazul I.V., Giniyatulin P.N., Kavin A.A., Litunovskii N.V., Makhankov A.N., Piskarev P.Yu., Tanchuk V.N. Plasma-Facing Components of the TRT Tokamak. — *Plasma Physics Reports*, 2021, vol. 47, № 12, p. 1220—1237.
9. Кукушкин А.С., Пшенов А.А. Режимы работы традиционного дивертора в TRT. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 11.
10. Mazul I.V. Alternative divertor target concepts for next step fusion devices. — *Nuclear Fusion*, 2016, vol. 56, p. 126009 (6 p.).
11. Мазуль И., Пискарев П., Танчук В. и др. Температурные режимы многослойной конструкции диверторной мишени при смещении пика тепловой нагрузки вдоль мишени дивертора энергонагруженного токамака. (Планируем опубликовать в ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез в 2025 г.)
12. Gagen-Torn V.K., Kirillov I.R., Komarov V.L. Experimental complex for high heat flux materials interaction results. — In: Proceedings of the 18th Symposium on Fusion Technology (SOFT). Karlsruhe, Germany, 22—26 August, 1994, p. 363—366.
13. Volodin A., Kuznetsov V., Davydov V., Kokoulin A., Komarov A., Mazul I., Mudyugin B., Ovchinnikov I., Stepanov N., Rulev R., Eremkin A., Rogov A., Prianikov V., Fedosov A. The high-heat-flux test facilities in the joint stock company. — *Fusion Eng. and Des.*, 2015, vol. 98—99, p. 1411—1414.
14. Makhankov A., Berkhov N., Divavin V., Giniyatulin R., Grigoriev S., Ibbott C., Komarov V., Labusov A., Mazul I., McDonald J., Tanchuk V., Youchison D. Analytical and Experimental Investigation of Cascade Effect Failure. — *Ibid.*, 2001, vol. 56—57, p. 337—342.

АО «НИИЭФА» им. Д.В. ЕФРЕМОВА, 196641 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ПОС. МЕТАЛЛОСТРОЙ,
ДОРОГА НА МЕТАЛЛОСТРОЙ 3, РОССИЯ



Роман Валерьевич Рулёв, главный специалист отдела тепловых испытаний
rulev@sintez.niiefa.spb.su



Игорь Всеволодович Мазуль, главный научный сотрудник, д. техн. н., ветеран атомной энергетики и промышленности
mazul@sintez.niiefa.spb.su



Павел Юрьевич Пискарев, начальник отделения «Энергонапряжённые многослойные компоненты»
piskarev@sintez.niiefa.spb.su



Владимир Евгеньевич Кузнецов, начальник отдела тепловых испытаний
kunetc@sintez.niiefa.spb.su



Вадим Вячеславович Левичев, ведущий научный сотрудник отдела тепловых испытаний, к.ф.-м.н.
levichev@sintez.niiefa.spb.su



Михаил Сергеевич Колесник, инженер-исследователь 1 категории
kolesnik@sintez.niiefa.spb.su



Владимир Вячеславович Рузанов, инженер-исследователь
ruzanov@sintez.niiefa.spb.su



Виктор Николаевич Танчук, начальник лаборатории, ветеран атомной энергетики и промышленности
victor.tanchuk@sintez.niiefa.spb.su

Статья поступила в редакцию 5 июня 2024 г.

После доработки 2 июля 2024 г.

Принята к публикации 5 июля 2024 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 3, с. 68—78.