

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИШЕНИ ДИВЕРТОРА ПРИ ИМИТИРОВАНИИ КАЧАНИЯ СЕПАРАТРИСЫ

Рулёв Р.В., Мазуль И.В., Пискарёв П.Ю., Кузнецов В.Е.,
Колесник М.С., Рузанов В.В., Танчук В.Н.
(АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Дивертор является одним из внутрикамерных компонентов термоядерных реакторов-токамаков и служит для отвода основной части энергии из плазмы, очистки ее от примесей в виде продуктов термоядерной реакции и эрозии первой стенки (покрывающей изнутри вакуумную камеру), обеспечения эффективной откачки внутреннего объема вакуумной камеры. Традиционно дивертор представляет собой конструкцию с активным водяным охлаждением, состоящую из жесткой стальной кассеты, с расположенными на ней обращенными к плазме элементами (двумя диверторными (вертикальными) и отражающими мишенями, а также куполом), имеющими вольфрамовую облицовку и бронзовую теплоотводящую структуру.

Дивертор является самым теплонагруженным элементом среди всех внутрикамерных компонентов. Тепловые нагрузки во время переходных процессов (срывы, ELMs) достигают величин, приводящих к оплавлению и разрушению диверторных мишеней. Основным способом снижения тепловых нагрузок на диверторные мишени в современных экспериментах на токамаках и в проектах будущих реакторов является организация режима газовой мишени в диверторном объеме, которая служит для упреждающего рассеяния значительной мощности в потоке диверторной плазмы прежде, чем она достигнет мишени. Несмотря на перспективность указанного способа, «классический» дивертор обладает существенным недостатком, связанным с высокой стоимостью плановой или аварийной замены компонента, а также рядом нерешенных материаловедческих проблем для применения в энергонагруженных токамаках-реакторах.

В существующих термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы, а также находящихся на стадии проектирования и/или строительства, тепловые нагрузки на обращенные к плазме элементы дивертора достигают предельно допустимых значений для выбранных материалов и конструкций. Расчетная тепловая нагрузка на элементы дивертора в этих установках может достигать 20 МВт/м^2 в переходных процессах длительностью не более 10 секунд, что является принятым на текущий момент инженерным лимитом для конструкции. В случае дальнейшего увеличения тепловой нагрузки вследствие различных причин (опциональное увеличение мощности, выносимой в дивертор; проблемы с достижением режима газовой мишени и пр.) существенно снижается ресурс элементов дивертора, что приводит к преждевременному разрушению теплоотводящих элементов и защитной облицовки (вольфрамовых плиток) данных элементов. Это влечет за собой необходимость выполнения ремонта или частой замены элементов дивертора. Поиск возможности увеличения ресурса работы обращенных к плазме элементов дивертора в условиях повышенных тепловых нагрузок до $30\text{--}40 \text{ МВт/м}^2$ является одним из ключевых вопросов в развитии термоядерных установок будущего.

«Размазывание» сильно пикированной тепловой нагрузки на диверторную мишень является мерой полезной (а иногда необходимой) для того, чтобы обеспечить теплоем выносимой в дивертор мощности для сдерживания умеренно высоких температур поверхности облицовки и обеспечения более широкого допустимого диапазона параметров теплоносителя. Кроме того, снижение эффективного теплового

потока через стенки мишени снижает градиенты температур в многослойной конструкции и обеспечивает увеличение ее срока службы под действием термонапряжений. Предварительные расчеты значения пиковой нагрузки на базовый (типа ИТЭР) вариант диверторной мишени, выполненные А. Кукушкиным с коллегами [1], показали, что при максимальной проектной мощности дополнительного нагрева плазмы в токамаке с реакторными технологиями (ТРТ) в 40 МВт, несмотря на специальную конфигурацию дивертора и впрыскивание примесей, способствующих формированию газовой мишени, получить нагрузку менее 20–25 МВт/м² не удастся. Более того, даже при неполной 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 счет относительно высоких значений мощности дополнительного нагрева и магнитного поля для компактной установки) на получение и изучение режимов высокой (как в ИТЭР и даже в ДЕМО) энергонагруженности компонентов, обращенных к плазме (КОП). В таких условиях необходимо принять страхующие 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/м².

В АО «НИИЭФА» в рамках проекта токамака ТРТ [2, 3] разрабатывается подход к увеличению ресурса работы вертикальных мишеней дивертора за счет смещения теплового потока относительно обращенных к плазме элементов. Данный подход подразумевает «размазывание» выносимой в дивертор мощности по большей площади, тем самым снижая эффективную плотность мощности теплового потока, что уменьшает риски разрушения обращенных к плазме элементов.

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

Вторым вариантом смещения тепловой нагрузки вдоль элементов дивертора рассматривается возможность качания самой мишени. Использование механического качания мишеней открывает дополнительные возможности для решения проблемы долговечности мишеней, а именно, дополнительно к «размазыванию» пикированной нагрузки по высоте мишени появляется возможность реализовать вариант съемной облицовки, а также дополнительного «размазывания» (как вертикального, так и азимутального) потока тепла (за счет движения жидкого металла, вызываемого качанием) на трубки с теплоносителем. [4]

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

За снижение эффективной (распределенной по большей площади мишени) тепловой нагрузки приходится платить увеличением числа термоциклов, которое зависит от частоты качания мишени/сепаратрисы. При относительно толстом (≥ 5 –10 мм) слое мишенной облицовки эффективная (усредненная в пространстве) тепловая нагрузка на теплоотводящий элемент определяется амплитудой «размазывания» пикированной нагрузки и уже при умеренной частоте качания ($\geq 0,2$ –0,3 Гц) от частоты более не зависит. Температура же поверхностного слоя облицовки и, следовательно, амплитуда термоциклирования поверхности вольфрама

(а следовательно, и градиенты температур и термических напряжений в облицовочной плитке) сильно зависят также от частоты качания нагрузки (помимо амплитуды качания). Выполненные ранее температурные расчеты для облицовки в режиме качания тепловой нагрузки показали, что эффективное снижение (усреднение/«размазывание» по времени) воздействия пикированного потока в режиме качания достигается при частотах более 0,3 Гц. Это снижение тем заметнее, чем выше частота качания, которая из-за инженерных ограничений вряд ли сможет быть сделана выше 1–3 Гц. Например, для диверторной мишени токамака ТРТ с продолжительностью горения плазмы в 100 секунд качание мишени/сепаратрисы с частотой 1 Гц увеличивает число циклов температурного нагружения 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 нагрузках и дополнительного циклирования.

Тепловые испытания были проведены на стенде «Цефей-М» в АО «НИИЭФА» [5,6].

1. Макет и оснастка

Для проверки работоспособности подхода «размазывания» тепловой нагрузки был изготовлен макет из медной трубы квадратного сечения, где располагались 4 зоны испытания с вольфрамовой облицовкой различного формата. В каждой зоне облицовка из вольфрама была выполнена единой плиткой 24×24 мм, кастелированной на более малые тайлы. Чертеж макета представлен на рис.1, а необходимая оснастка для удобства эксперимента на рис.2. Нумерация плиток по порядку слева направо. За счет имитации качания тепловой нагрузки по поверхности облицовки вдоль макета воспроизводились условия характерные для перемещения сепаратрисы вдоль мишени дивертора.

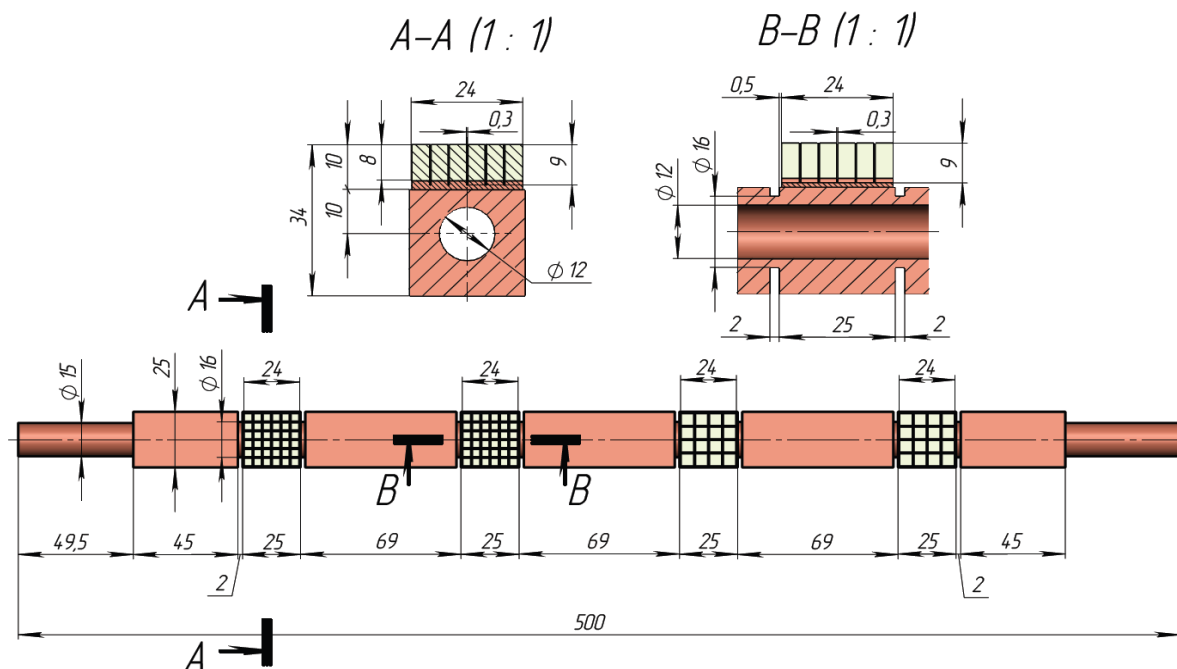


Рис. 1. Чертеж трубчатого макета диверторной мишени для проведения циклических тепловых испытаний, имитирующих режимы качающегося дивертора

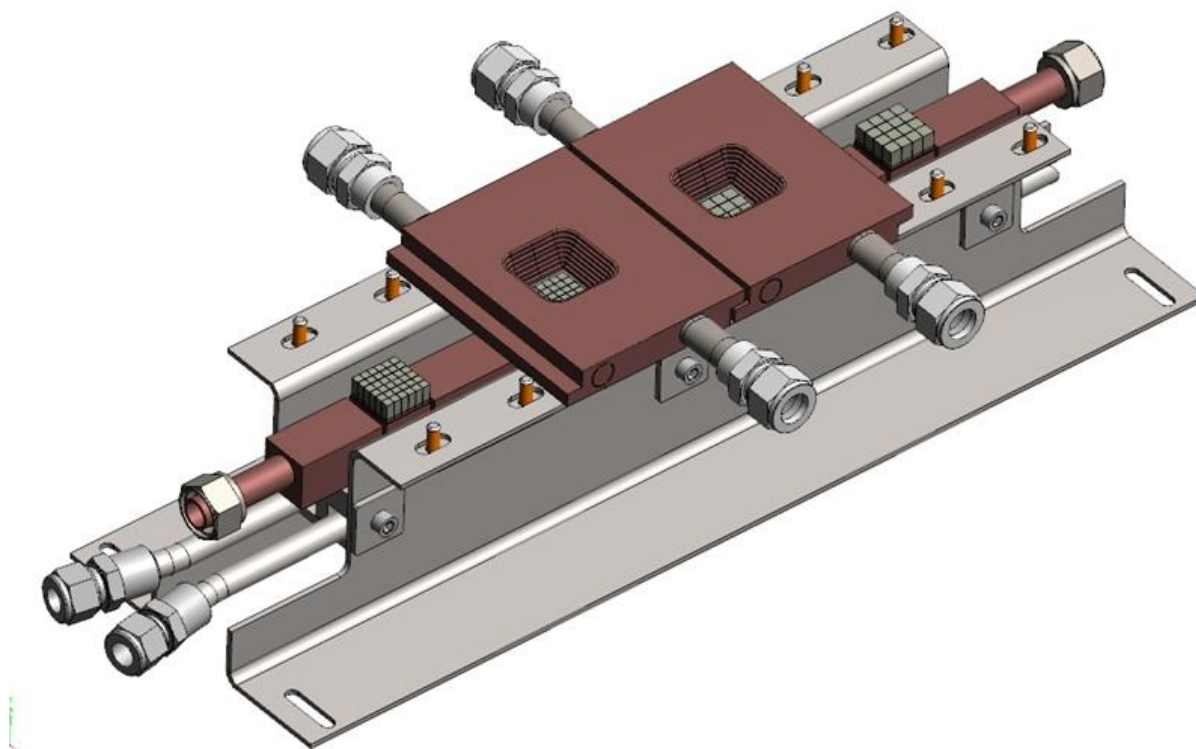


Рис. 2. Оснастка для тепловых испытаний (крайние маски убраны для наглядности)

Каждая из четырех зон испытаний была ограничена медной оконной маской. Параметры теплоносителя для проведения тепловых испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры теплоносителя

Параметр	Единицы измерения	Значение
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	с	непрерывно
Поперечное сечение водяного канала	мм ²	113

2. Стенд Цефей-М

Схема проведения тепловых испытаний на стенде «Цефей-М» приведена на рис. 3. На подвижном модуле стенда был смонтирован макет в оснастке. Металлорукавами к макету был подключен контур охлаждения с параметрами теплоносителя, приведенными выше. Над макетом были установлены 4 медные оконные маски (рис. 4), подключенные к отдельному контуру охлаждения. Макет на подвижном модуле был помещен в вакуумную камеру.

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

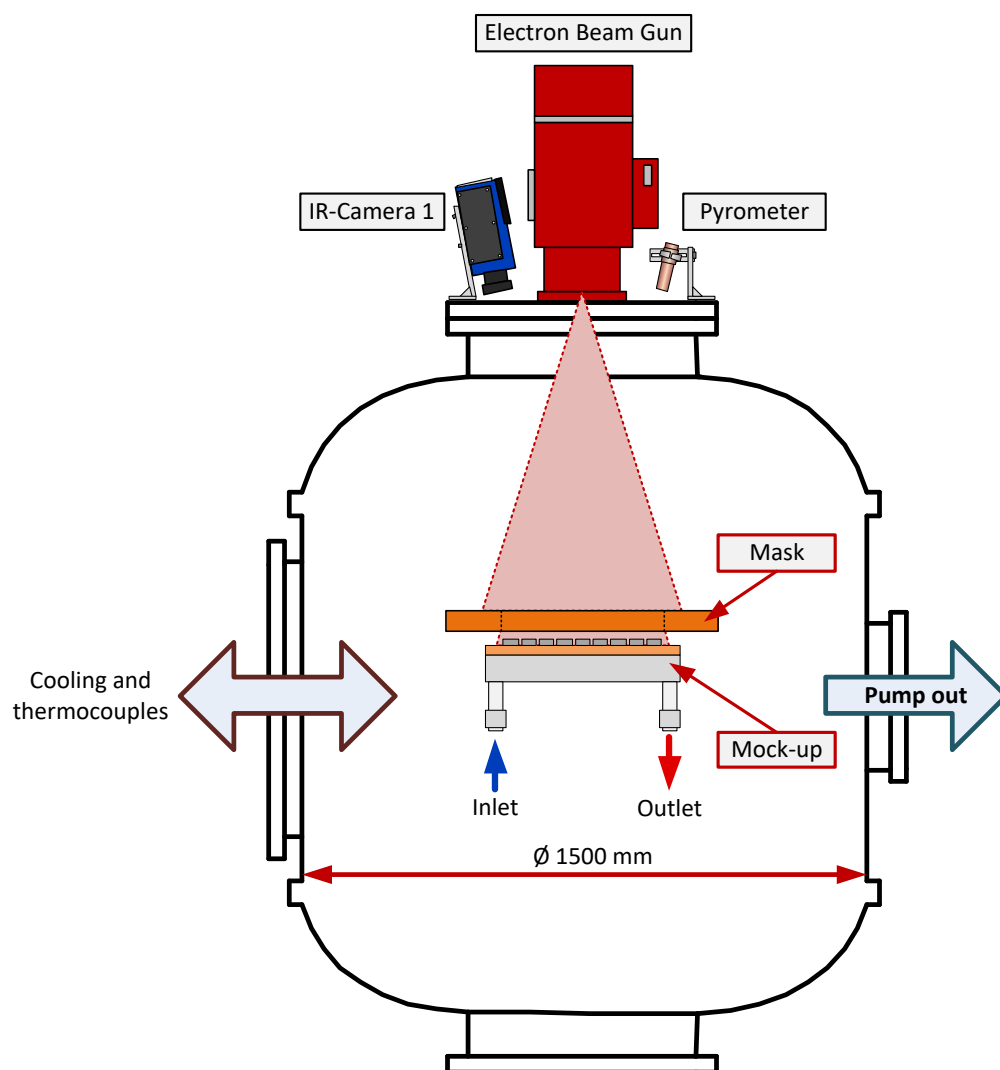


Рис. 3. Схема проведения тепловых испытаний

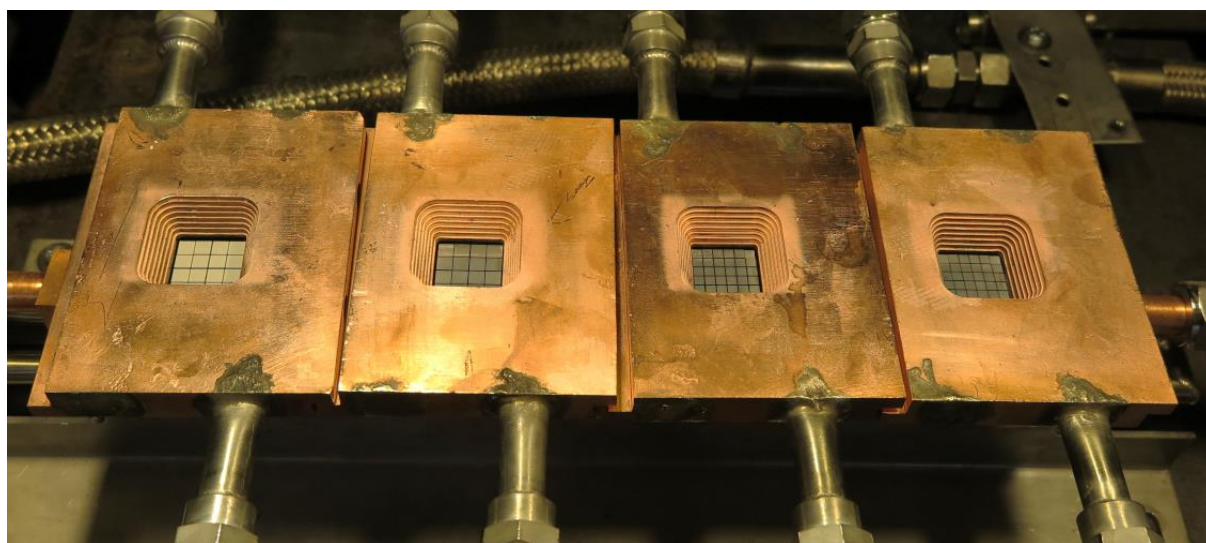


Рис. 4. Макет с установленными защитными масками

3. Моделирование тепловой нагрузки. Тепловые расчеты

Перед проведением тепловых испытаний макета были подготовлены тепловые расчеты и смоделированы нагрузки в схожих режимах.

В процессе расчетов были получены данные о тепловом состоянии макетов как для стационарных нагрузок, так и для импульсных нестационарных режимов теплового нагружения. Схема вывода результатов для характерных интересующих точек представлена на рис. 7 (справа). Форма импульсов нагружения была принята прямоугольной. При моделировании была учтена кривая кипения и возможность наступления кризиса теплоотдачи на поверхности канала охлаждения. Для эффективного перемешивания охлаждающей воды внутри круглого канала охлаждения макета при расчетах размещена 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.

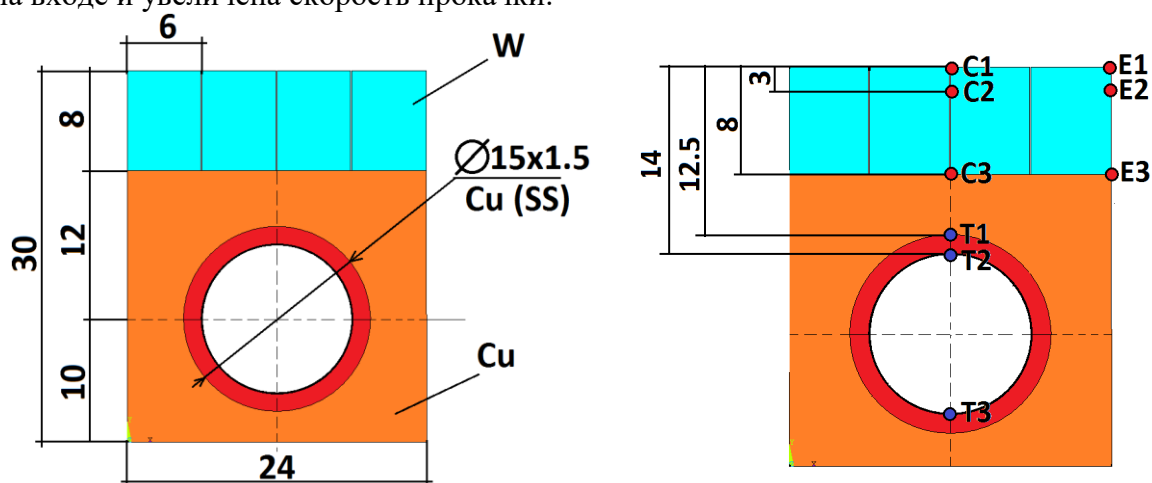


Рис.5. Модель. Характерные размеры. Материалы. Схема вывода результатов для точек

В расчетах использованы следующие параметры макета и системы охлаждения:

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

Результаты теплового расчета для стационарной нагрузки $q=20\text{ МВт/м}^2$ представлены в табл. 2 и на рис. 8.

Таблица 2

Тепловой расчет для стационарной нагрузки $q=20\text{ МВт/м}^2$

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		

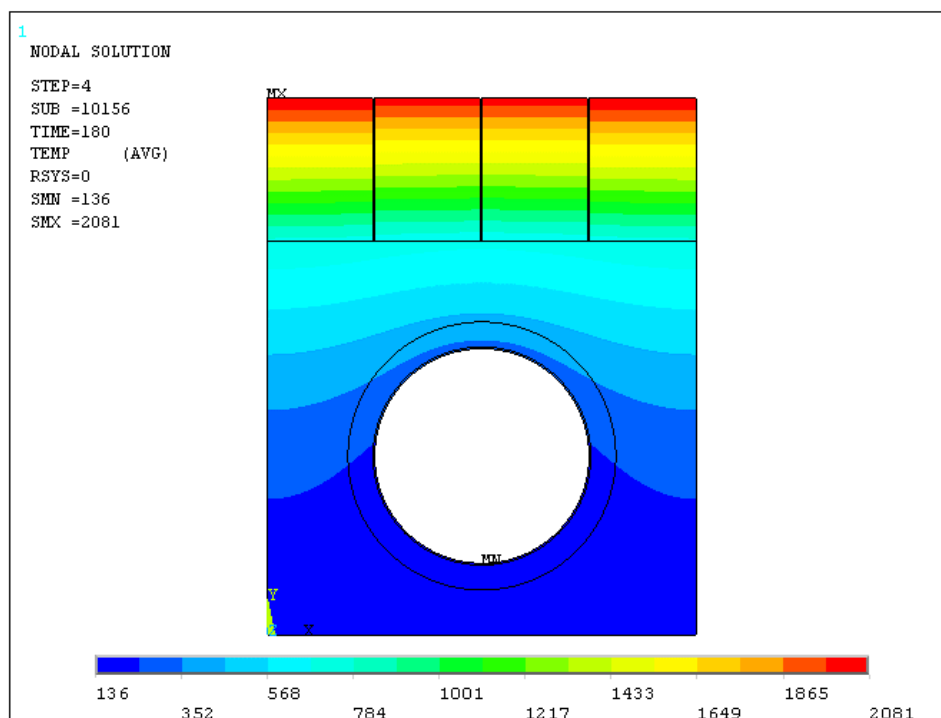


Рис.6. Распределение температуры, вариант 1–стационарная нагрузка $q=20\text{MW/m}^2$

Видно, что в отсутствии качания тепловой нагрузки температура вольфрама превышает $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, что существенно выше температуры его рекристаллизации, а максимальная температуры медного охлаждаемого основания превышает $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к заметному испарению меди. В таких условиях конструкция работает на пределе, а ее срок службы будет небольшим.

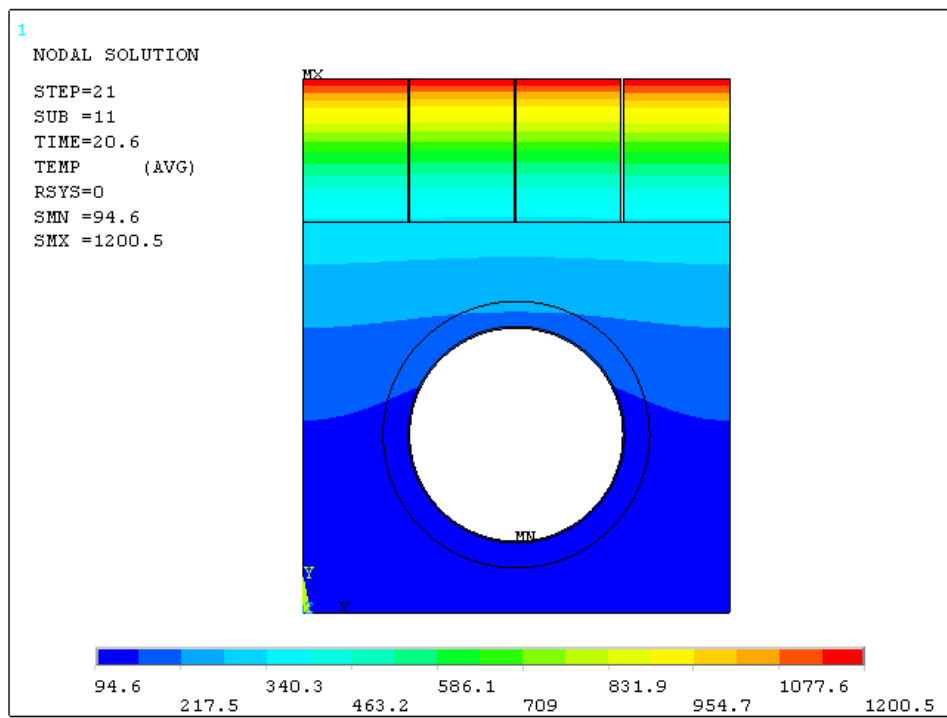
Во втором варианте расчета приведено моделирование импульсной нагрузки с тепловым поток $q=20\text{MW/m}^2$, длительностью импульса в $t=0,6\text{ с}$ и длительностью паузы в $t=1,4\text{ с}$. Данное соотношение длительности нагрева и паузы охлаждения соответствуют вполне реализуемому режиму качания, в котором размах (двойная амплитуда отклонения нагрузки от среднего положения) качания превышает ширину прямоугольного пика нагрузки в $2/0,6=3,5$ раза, а частота качания составляет $0,5\text{ Гц}$.

Результаты теплового расчета для импульсной нагрузки $q=20\text{MW/m}^2$ представлены в табл. 3 и на рис. 7 и 8.

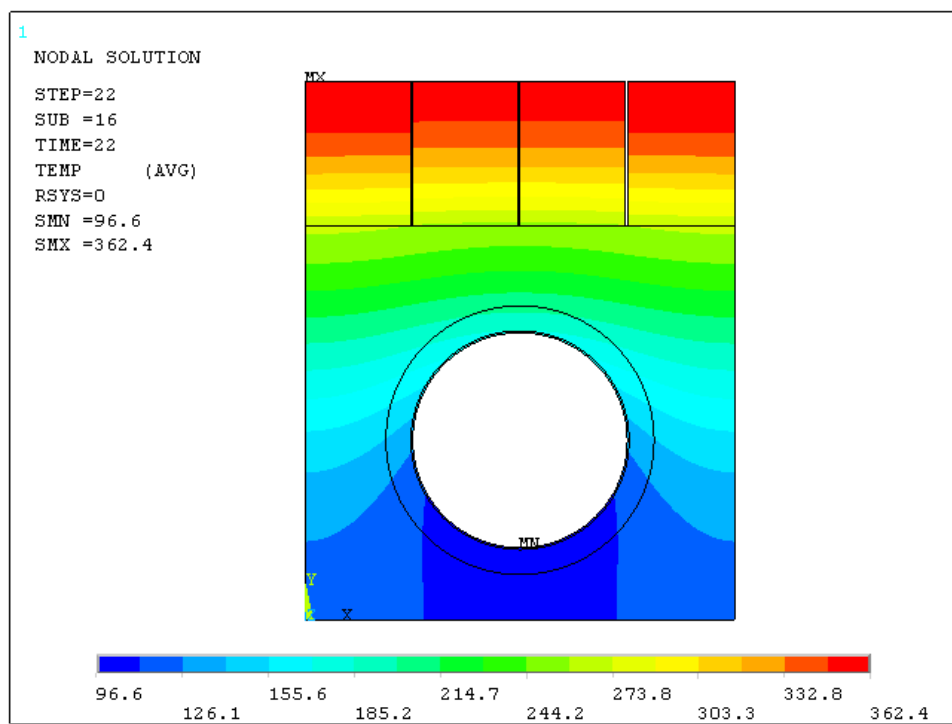
Таблица 3

Тепловой расчет для импульсной нагрузки $q=20\text{MW/m}^2$

Конец импульса $t=0,6\text{ с}$		Конец паузы $t=1,4\text{ с}$	
Обозначение точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Обозначение точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$
C1	1194	C1	356
C2	773	C2	341
C3	324	C3	255
T1	229	T1	205
T2	201	T2	183
T3	95	T3	97
E1	1200	E1	362
E2	779	E2	347
E3	332	E3	263



Конец импульса



Конец паузы

Рис.7. Распределение температуры, импульсная нагрузка $q=20\text{MW/m}^2$

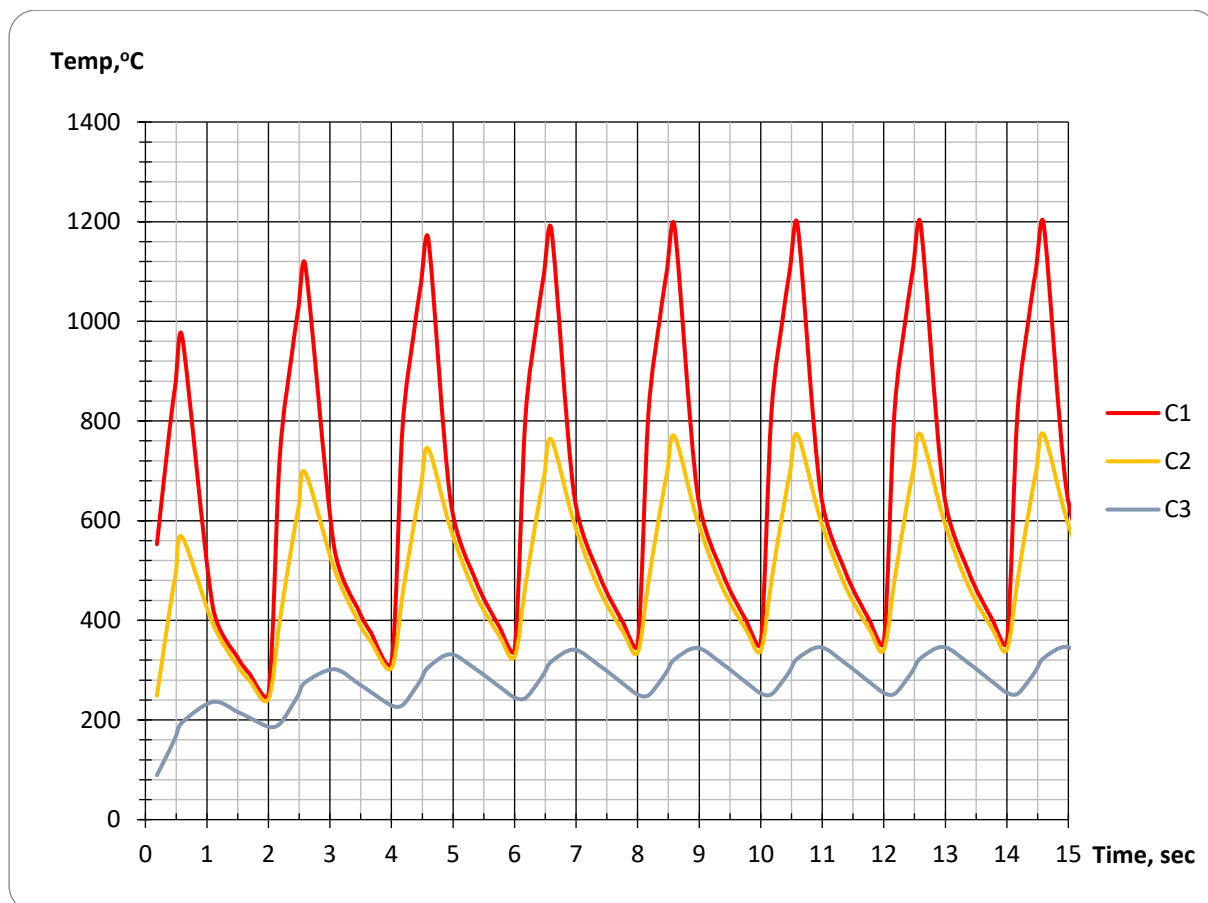


Рис.8. Изменение температуры, импульсная нагрузка $q=20\text{MW/m}^2$

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, расчеты показали, что умеренное качание пикированной нагрузки может существенно снизить максимальные температуры мишени и еще в большей степени уменьшить амплитуды термоциклирования.

Каким образом увеличение числа циклов отразится на поведении вольфрама предстоит определить экспериментально. Поскольку величина термонапряжений (в т.ч. циклических) зависит от поперечного размера плитки.

Макет был облицован для сравнения плитками с тайлами двух разных типоразмеров с поперечным сечением 6×6 мм и 4×4 мм.

4. Тепловые испытания на стенде «Цефей-М»

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

4.1. Первый этап тепловых испытаний

На первом этапе тепловых испытаний нагрев плиток проходил по следующей циклограмме: 0,66 с (плитка № 2) → 0,33 с (№ 3) → 0,66 с (№ 4) → 0,33 с (№ 3).

Тепловой поток составлял 20MW/m^2 .

Общее количество сделанных циклов (по 2 секунды каждый) составило 20 000.

В данном режиме для плиток № 2 и № 4 режим термоциклирования близок к расчетному (см. выше).

В результате проведенных испытаний на этапе 1 видимых изменений поверхности макета не выявлено, как не выявлено и каких-либо изменений качества теплосъема.



Рис.9. Фотографии поверхности плиток после первого этапа

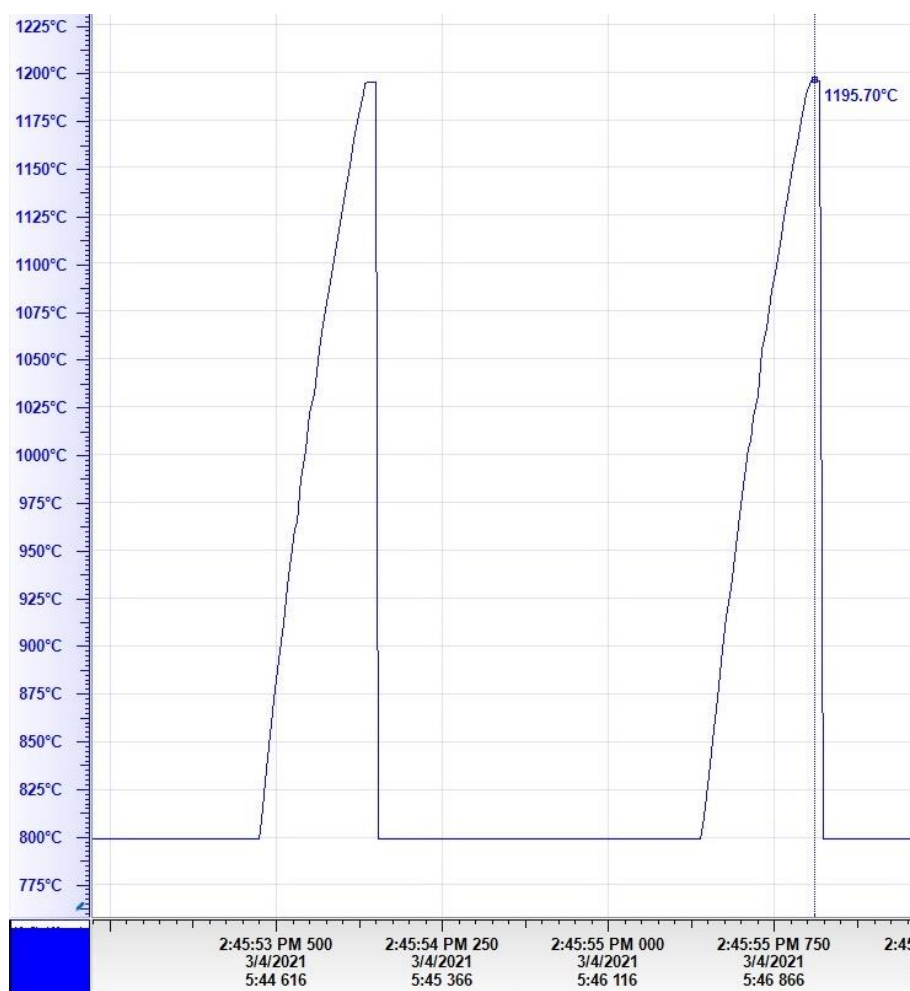


Рис.10. Показания пирометра (Плитка № 2) – 1196 °C

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

4.2. Второй этап тепловых испытаний

На втором этапе тепловых испытаний нагрев плиток проходил по другой 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 циклов (по 1 секунде каждый) составило 30 000.

В результате проведенных испытаний на этапе 2 происходит матирование поверхности плиток вольфрама, изменений качества теплосъема макетом не выявлено.

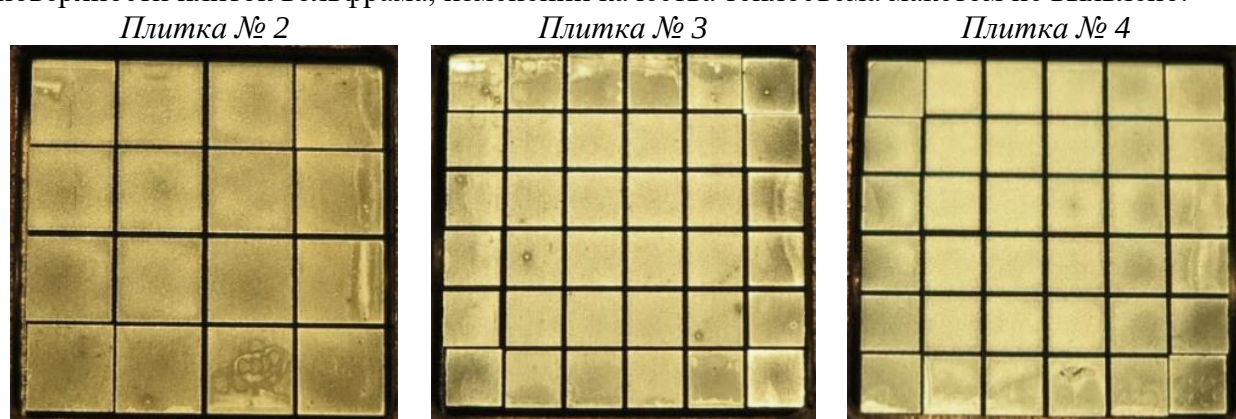


Рис.11. Фотографии поверхности плиток после второго этапа

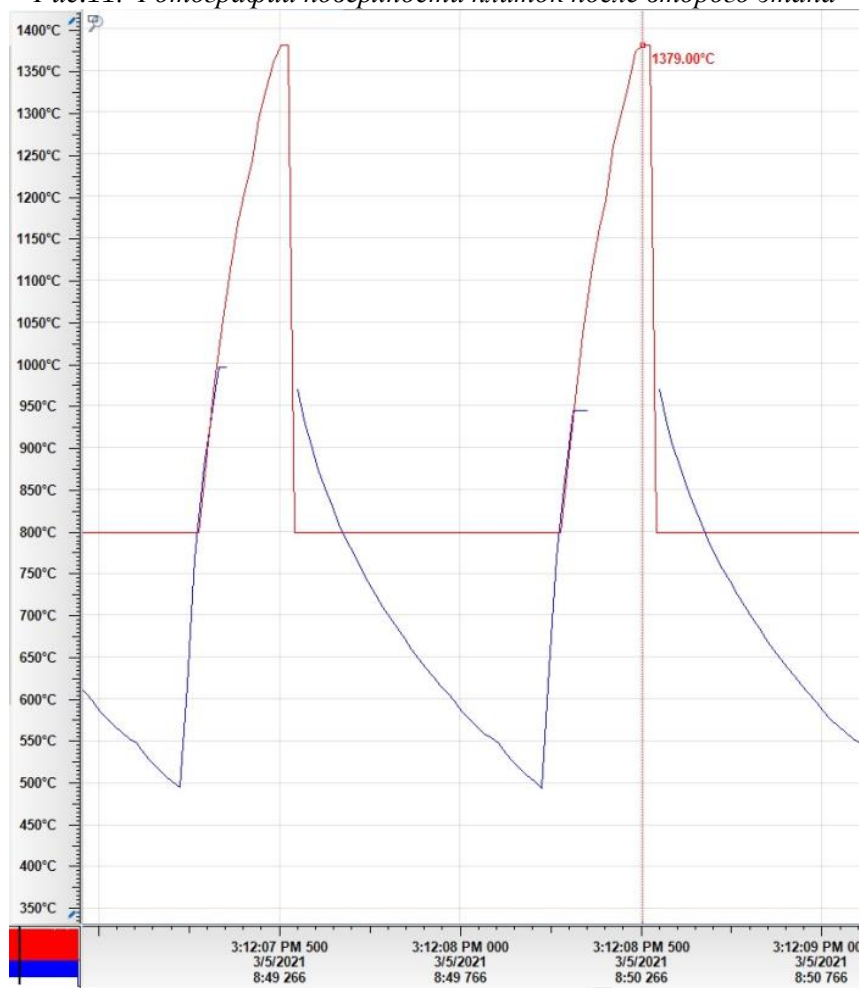


Рис. 12. Показания пирометра (Плитка № 4) – 1379 °С

4.3. Третий этап тепловых испытаний

На третьем этапе тепловых испытаний нагрев плиток проходил по следующей циклограмме: 0,333 с (плитка № 2) → 0,167 с (№ 3) → 0,333 с (№ 4) → 0,167 с (№ 3).

Тепловой поток составлял 30 МВт/м².

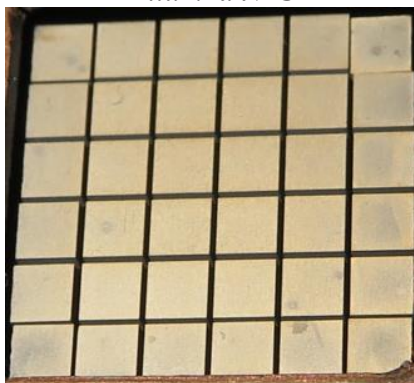
Общее количество сделанных импульсов (по 1 секунде каждый) составило 20 000.

В результате проведенных испытаний на этапе 3 происходит матирование поверхности плиток вольфрама, заметны небольшие трещинки на поверхности, изменений качества теплосъема макетом не выявлено.

Плитка № 2



Плитка № 3



Плитка № 4



Рис.13. Фотографии поверхности плиток после третьего этапа.

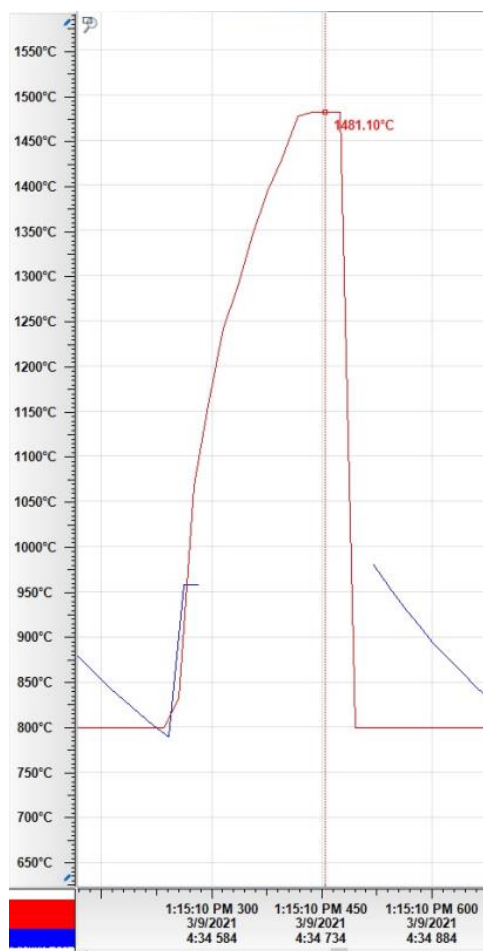


Рис.14. Показания пирометра
(Плитка № 3) – 1481 °С

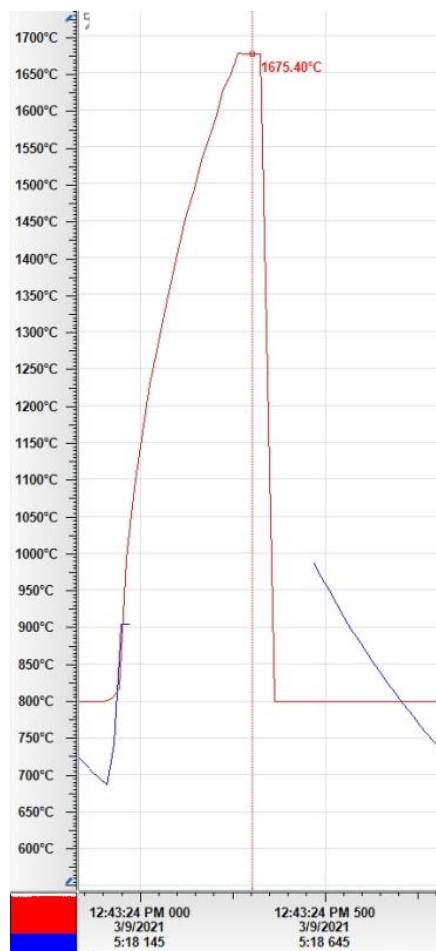


Рис.15. Показания пирометра
(Плитка № 4) – 1675 °С

4.4. Исследование поверхности после Этапа № 3

После завершения третьего этапа было проведено исследование поверхности плиток при помощи оптического микроскопа. Самые явные дефекты по результатам тепловых испытаний приведены на рис. 16 и Рис.17.



Рис.16. Результаты исследования поверхности после этапа 3. Плитка № 2

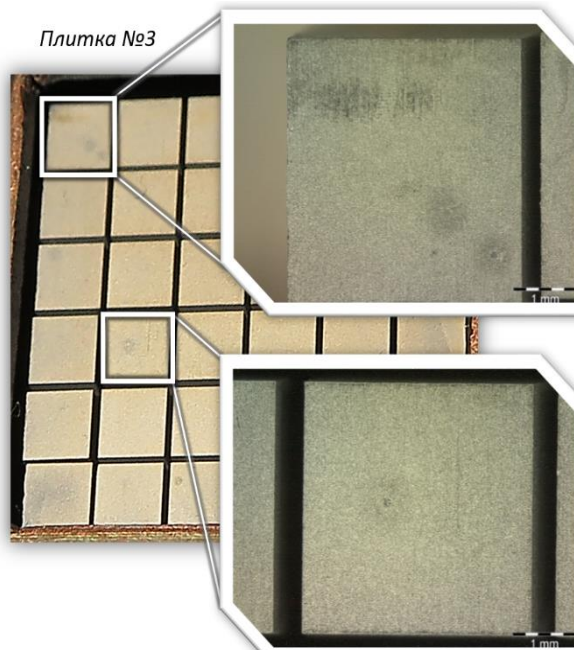


Рис.17. Результаты исследования поверхности после этапа 3. Плитка № 3

Видно, что на плитке № 2 на тайлах с поперечным сечением 6х6 мм после 70 000 циклов (после этапов № 1–3) появились усталостные трещины, наличие которых, впрочем, не сказалось на работоспособности конструкции. При последующем термоциклировании на этапе 4 и 5 (дополнительное число термоциклов составило $10 + 65,7 = 75,7$ тысяч, см. ниже) выявленные трещины не получили видимого развития. На плитках с меньшим поперечным размером (4х4 мм) усталостных трещин не заметно.

4.5. Четвертый этап тепловых испытаний. Имитация срывов.

На четвертом этапе тепловых испытаний 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) путем фокусировки пучка до значений $q \geq 500 \text{ МВт/м}^2$ 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/м^2 ; мощность в пучке 57 кВт. Плотность поглощенной энергии при имитации переходных нагрузок составила $500 \text{ МВт/м}^2 \times 10 \text{ мс} = 5 \text{ МДж/м}^2$.

Общее количество сделанных импульсов (по 1 секунде каждый) составило 10 000.

В результате проведенных испытаний на этапе 4 произошло значительное оплавление в зоне фокусировки пучка, изменений качества теплосъема макетом не выявлено.

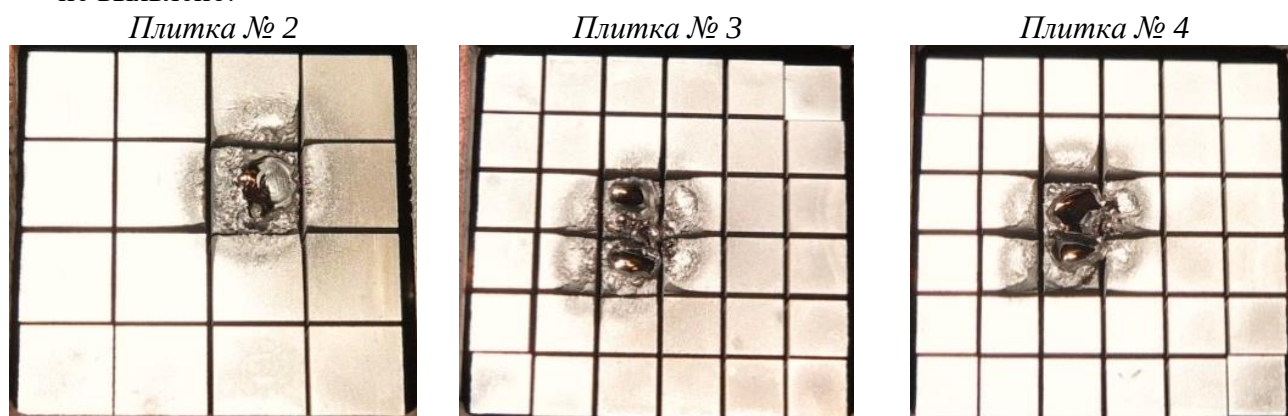


Рис.18. Фотографии поверхности плиток после четвертого этапа.

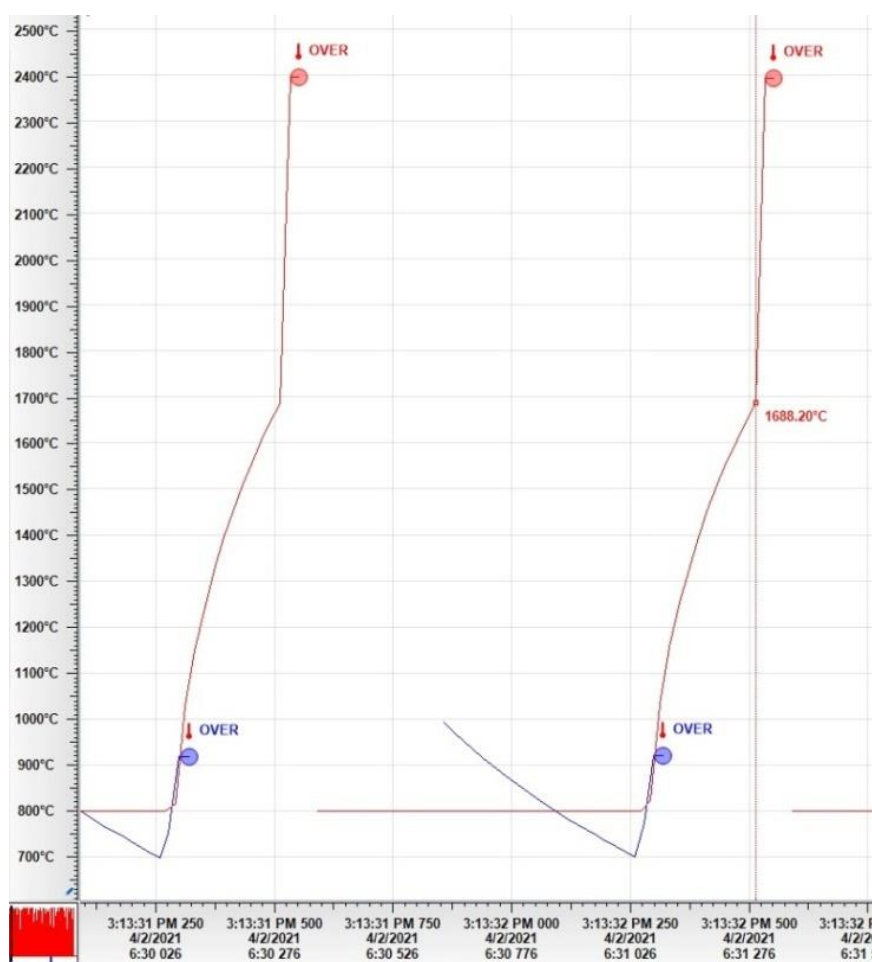


Рис. 19. Показания пирометра (Плитка № 4) – 1688 °С

4.6. Пятый этап тепловых испытаний

На пятом этапе тепловых испытаний 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 секунде составило 65 700.

В результате проведенных испытаний на этапе 5 происходит матирование поверхности плиток вольфрама и зоны оплавления, заметны небольшие трещинки на поверхности, изменений качества теплосъема макетом не выявлено (Рис. 20, 21).



Рис.20. Фотографии поверхности плиток после пятого этапа

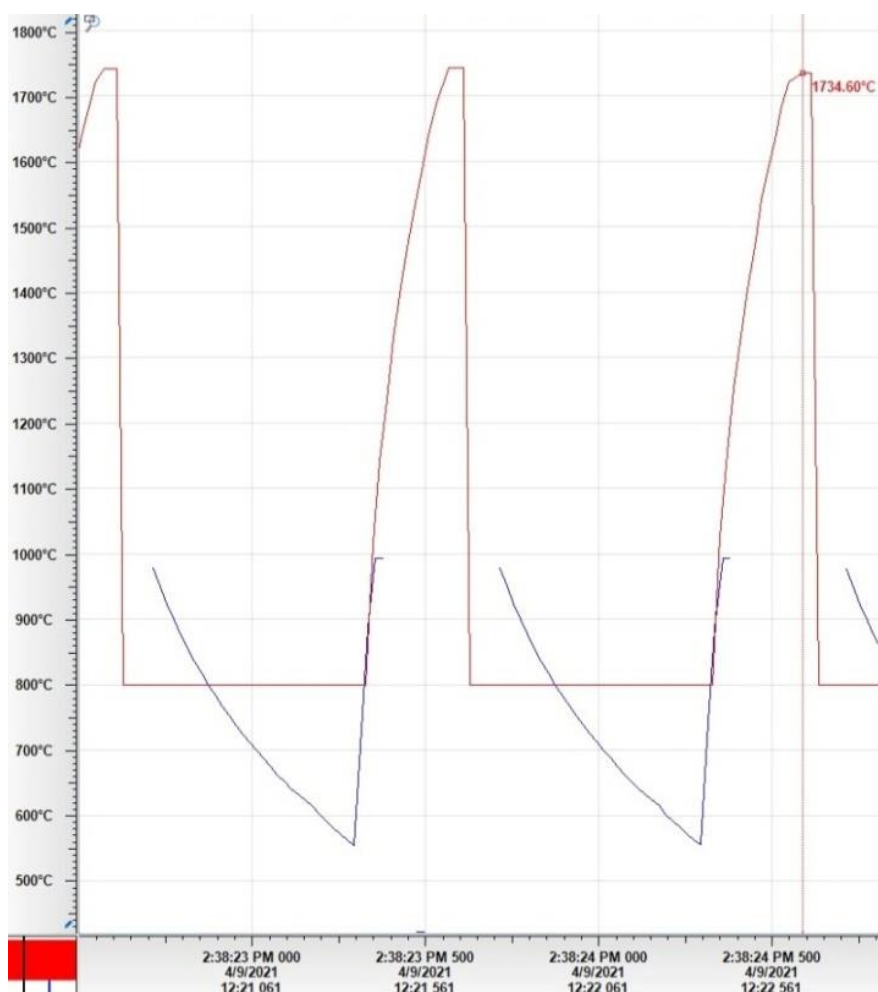


Рис. 21. Показания пирометра (Плитка №4) – 1735 °C

Выводы

Выполнено 20 000 циклов при 20 МВт/м² без видимых изменений поверхности макета. Тем самым продемонстрировано, что плоские облицовочные плитки выдерживают указанную нагрузку не хуже, чем облицовка типа моноблок.

После 50 000 циклов при 30 МВт/м² на плитках с более крупными тайлами обнаружены трещины небольшого размера, идущие по направлению от поверхности макета в сторону охлаждающей трубки; появление трещин не сказалось на качестве теплосъема облицовки. Дальнейшее уменьшение поперечного размера тайлов (4x4 мм) показывает возможность продления термоциклического ресурса облицовки.

После дополнительных 85 000 циклов при 30 МВт/м² видимого изменения размера трещин не отмечено.

Выполнение 10 000 циклов при 30 МВт/м² с наложением фазы фокусировки пучка до значений $q \geq 500$ МВт/м² и длительностью $\tau = 10$ мс, имитирующей режимы краевых мод (ELMs), привело к значительному многократному оплавлению поверхности вольфрама.

После всех тепловых испытаний ухудшения теплового контакта облицовки и медной подложки не наблюдалось, что подтверждает работоспособность предложенной концепции.

Развитие данной концепции может дать возможность эффективно снимать с элементов дивертора до 40–50 МВт/м² теплового потока.

На центральной плитке макета (№ 3) общее число выполненных термоциклов при 30 МВт/м² достигло значения в 270 000.

Список литературы

1. Кукушкин А.С, Пшенов А.А. Режимы работы традиционного дивертора в TRT. Физика плазмы. 2021 Т47. № 11.
2. A.V. Krasilnikov, S.V. Konovalov, E.N. Bondarchuk, I.V. Mazul et al Tokamak with Reactor Technologies (TRT); Concept, Missions, Key Distinctive Features and Expected Characteristics, Plasma Physics Reports, 2021, 47(11), pp. 1092–1106.
3. И.В. Мазуль, Р.Н. Гиниятулин, А.А. Кавин, Н.В. Литуновский, А.Н. Маханьков, П.Ю. Пискарев, В.Н. Танчук «Обращенные к плазме компоненты токамака TRT», Физика Плазмы, 2021, том 47, № 12, с. 1103–1122 или I.V. Mazul, P.N. Giniyatulin, A.A. Kavin, N.V. Litunovskii, A.N. Makhankov, P. Yu. Piskarev, and V.N. Tanchuk. Plasma-Facing Components of the TRT Tokamak // Plasma Physics Reports Vol. 47, No. 12 (2021), pp. 1220–1237.
4. I.V. Mazul. Alternative divertor target concepts for next step fusion devices, Nuclear Fusion, v.56 (2016) 126009 (6pp).
5. V.K. Gagen-Torn, I.R. Kirillov, V.L. Komarov, 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, pp.363–366.
6. A. Volodin, V. Kuznetsov, V. Davydov, A. Kokoulin, A. Komarov, I. Mazul, B. Mudyugin, I. Ovchinnikov, N. Stepanov, R. Rulev, A. Eremkin, A. Rogov, V. Prianikov, A. Fedosov The high-heat-flux test facilities in the joint stock company “D.V.Efremov Institute of Electrophysical Apparatus”, Fusion Engineering and Design 98–99 (2015) 1411–1414.