

ТВЕРДЫЕ ТЕЛА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

УДК 536.79

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ МАКЕТА МОДУЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА (МЛД) В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

© 2024 г. Е. Ю. Тулубаев^а*, В. Н. Кудияров^б, Н. Н. Никитенков^б, И. Л. Тажибаева^а,
А. В. Вертков^с, М. Ю. Жарков^с, Ю. В. Понкратов^а, Ю. Н. Гордиенко^а, В. С. Бочков^а

^аИнститут атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, 140000 Казахстан

^бТомский политехнический университет, Томск, 634050 Россия

^сАО «НИКИЭТ», Москва, 107140 Россия

*E-mail: tulubaev@nnc.kz

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Данная работа посвящена методике проведения экспериментов по исследованию процесса охлаждения газо-капельным потоком низкого давления в условиях высоких энергетических нагрузок на приемную поверхность макета модуля литиевого дивертора (МЛД). В работе подробно описана конструкция макета МЛД, все основные системы, параметры и схема стенда для проведения испытаний. Рассчитаны рабочие режимы водяной и газовой систем охлаждения при тепловом воздействии на макет МЛД мощностью равной 5 МВт/м². Приведено описание эксперимента по отработке методики охлаждения макета МЛД газо-капельным потоком низкого давления.

Ключевые слова: макет МЛД, газо-капельный поток, энергетические нагрузки, методика, охлаждение, экспериментальный стенд

DOI: 10.56304/S2079562923030351

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений Европейской программы по развитию термоядерной энергетики является создание физической и технологической основы для надежного отвода тепловых потоков удельной плотностью 10–20 МВт/м² при различных режимах работы термоядерного реактора [1, 2]. Существующие технические и материаловедческие решения не позволяют полноценно решить эту задачу. Так, в успешно реализуемом в настоящее время силами мирового сообщества проекте экспериментального токамака ИТЭР предусматривается периодическая замена приемных элементов дивертора, способных выдерживать лишь ограниченное время приходящие на них тепловые нагрузки. Альтернативным решением этой проблемы является использование жидких металлов и, в первую очередь, лития в качестве обращенного к плазме материала. Одним из важных достоинств лития является его малый атомный заряд Z , что способствует решению такой проблемы, как загрязнение плазменного шнура тяжелыми примесями, попадающими в плазму из первой стенки и диверторной области. Использование принципиально нового материала литиевой ка-

пиллярно пористой системы КПС, в котором жидкий литий заключен в матрицу из пористого твердого материала, как показывает накопленный до настоящего времени опыт [3–5] позволит создать долговечную, не повреждаемую и само обновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов (ВЭ), которая не оказывает фатального воздействия на термоядерную плазму. Данный результат достигается благодаря так называемому эффекту экранирования и капиллярным свойствам КПС. Процесс экранирования заключается в том, что пары испарившегося лития создают защитный слой, который в свою очередь переизлучает поступающий поток энергии [6]. Также благодаря характерным свойствам КПС основанным на зависимости капиллярного давления в каналах от радиуса мениска жидкого лития на поверхности КПС [7] обеспечивается постоянная подача лития в зоны, подвергшиеся испарению. Благодаря данным свойствам образец литиевой КПС не может быть разрушен. Именно данный факт объясняет повреждение сетки литиевой КПС при облучении ее гелиевой плазмой мощностью 9 МВт/м² на установке Magnum-PSI. При проведении экспериментов на данной установке не было создано системы постоянной подпитки КПС литием в ре-



Рис. 1. Литиевая КПС после воздействия дейтериевой плазмы.

зультате сетка КПС за счет испарения лития оголяется и остается без литиевой защиты [8].

Соответственно, литий в настоящее время является наиболее привлекательным и наиболее исследованным из жидких металлов материалом для использования в капиллярно-пористой системе КПС [9, 10].

Преимущества литиевых КПС в качестве материалов, обращенных к плазме, было подтверждено множеством экспериментов с литиевыми устройствами как в моделирующих условиях, так и в условиях токамаков [11, 12]. Проведенные исследования в полной мере подтверждают, что литиевые внутрикамерные элементы способны к само регенерации и могут обеспечить в отличие от твердых материалов (вольфрам и др.) длительную стационарную работу токамака, но, к сожалению, требуется в полной мере решение проблемы отвода больших тепловых потоков.

Одним из важных требований, предъявляемым к литиевым КПС, является удержание максимальной температуры ее поверхности на уровне 700°C [13], для ограничения попадания больших потоков газообразного лития при испарении в вакуумную камеру термоядерного реактора. Последние исследования по облучению дейтериевой плазмой на плазменно пучковой установке ППУ [14] подтвердили, что литиевая КПС прекрасно отводит тепло и сохраняет свою форму рис. 1, но при этом температура ее поверхности превысила 800°C рис. 2 [15].

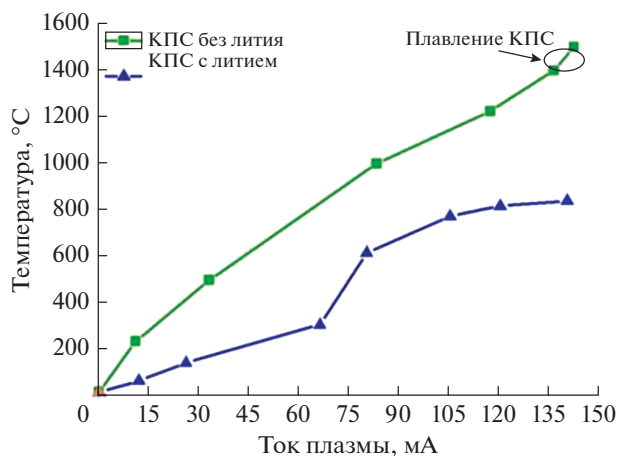


Рис. 2. Зависимость температуры мишени от тока дейтериевой плазмы.

Таким образом экспериментальные данные наглядно показывают, что отвод энергии от поверхности дивертора на основе литиевой КПС должен осуществляться с помощью специальной системы охлаждения, способной обеспечить соответствующий температурный режим. Анализ возможности использования традиционных теплоносителей (газообразный гелий, вода, жидкие металлы) для систем охлаждения установок термоядерного синтеза показал, что конвективный механизм отвода тепла, характерный для однофазных теплоносителей, не позволяет отводить столь мощные тепловые потоки в безопасном режиме [16]. Все это в сочетании с повышенными требованиями по безопасности и совместимости конструкции дивертора с другими внутрикамерными элементами токамака, охлаждаемыми водой, в современных установках термоядерного синтеза привели к необходимости поиска других технологических решений системы охлаждения модуля дивертора на основе литиевой КПС.

Одним из решений вышеуказанной проблемы стало инновационное предложение российских ученых использовать для охлаждения внутрикамерных устройств в установках управляемого термоядерного синтеза (лимитер, дивертор, первая стенка) мелкодисперсную смесь воды и газа с низкими значениями давления. Предварительные исследования эффективности и безопасности системы охлаждения с теплоносителем на основе газодляного спрея были проведены в Российской Федерации в лабораторных условиях на модельных образцах внутрикамерных элементов, изготовленных из меди [16]. После лабораторных исследований данный теплоноситель впервые на практике был использован для охлаждения лимитера, с приемной поверхностью на основе КПС, заполненной оловом, при проведении плазменных экспериментов на токамаке FTU (Италия) [17].

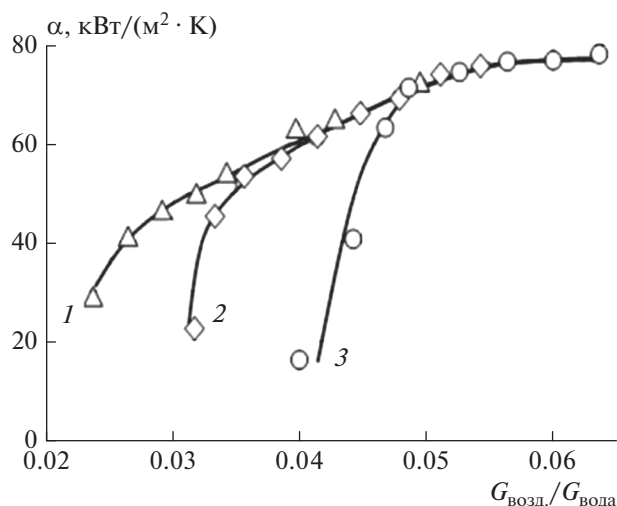


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от отношения массового расхода газа и воды при расходе воды 0.033 (1), 0.042 (2), 0.050 кг/с (3).

Как показали проведенные исследования, использование мелкодисперсного газовойдяного диспергированного потока, обладающего высокими теплофизическими характеристиками, позволяет снизить давление в трактах охлаждения и иметь низкое объемное содержание воды в каналах внутрикамерного элемента. Для теплоносителя на основе газовойдяного спрея принципиально отсутствует проблема МГД-сопротивления при его течении в магнитном поле токамака. Кроме того, такому теплоносителю не присуще возникновение кризисных явлений при теплоотдаче за счет высокой теплоты испарения мелкодисперсной жидкой фазы (2.4 МДж/кг) и высокого коэффициента теплоотдачи (75 кВт/м²К). Как видно из рис. 3 эффективность охлаждения газо-капельным потоком возрастает с увеличением дисперсности жидкой фазы, которая растет с ростом удельного расхода газа, подаваемого в форсунку, при постоянном расходе воды, данный факт необходимо учитывать при подборе режима охлаждения макета модуля литиевого дивертора МЛД [17].

Внедрение предлагаемого способа охлаждения в практику токамаков (в частности для токамака КТМ) [18] требует проведения широкого комплекса экспериментальных исследований, в первую очередь отработки методики исследований в стендовых условиях.

В работе описаны: конструкция макета МЛД, основные системы, параметры и схема стенда для проведения испытаний с макетом МЛД. Приведено описание эксперимента, в результате которого была получена динамика нагрева макета МЛД при охлаждении парогазовой смесью и без охлаждения. Проведенный эксперимент подтвердил кор-

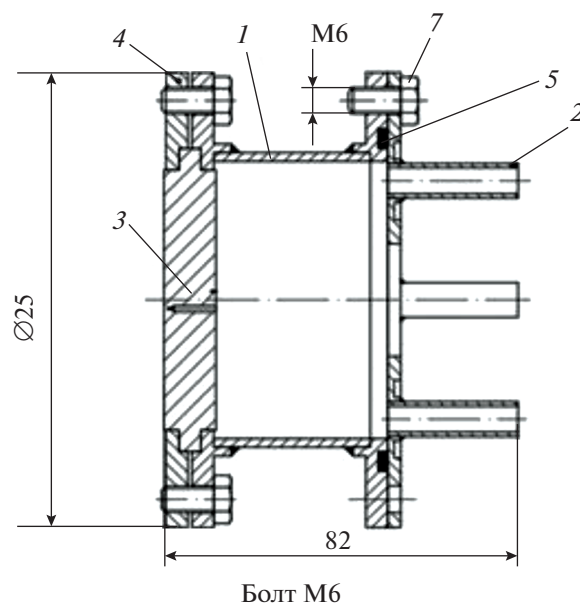


Рис. 4. Сборочный чертеж макета МЛД охлаждаемого парогазовой смесью низкого давления. 1 — корпус; 2 — переходник; 3 — медный макет; 4 — фланец; 5 — кольцо уплотнительное; 7 — болт М6.

ректность разработанной методики по охлаждению макета МЛД парогазовой смесью низкого давления в условиях высоких энергетических нагрузок.

МАКЕТ МОДУЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА

В настоящее время имеется ограниченное число экспериментов по применению нового теплоносителя для охлаждения внутрикамерных элементов термоядерных реакторов [17, 19], и поэтому целесообразно провести исследования в стендовых условиях с маломасштабным МЛД, что позволит подобрать оптимальный режим работы всех систем охлаждаемого полномасштабного МЛД и избежать технических ошибок при проведении плазменных испытаний на токамаке КТМ. Для проведения экспериментальных стендовых исследований было принято решение использовать его уменьшенный прототип — макет МЛД охлаждаемый одной форсункой. Конструкция макета МЛД представлена на рис. 4.

Основу конструкции прототипа МЛД составляет коррозионностойкая аустенитная сталь марки 12Х18Н10Т. Так как испытания будут проводиться не в вакуумных условиях, а в условиях воздействия атмосферных газов, то в целях обеспечения безопасности проведения испытаний в конструкции макета КПС с литьем произведена замена на эквивалентное тепловое сопротивление путем соответствующего утолщения стенки принимающей поверхности. В данном случае наличие КПС с литьем не имеет принципиального значения для

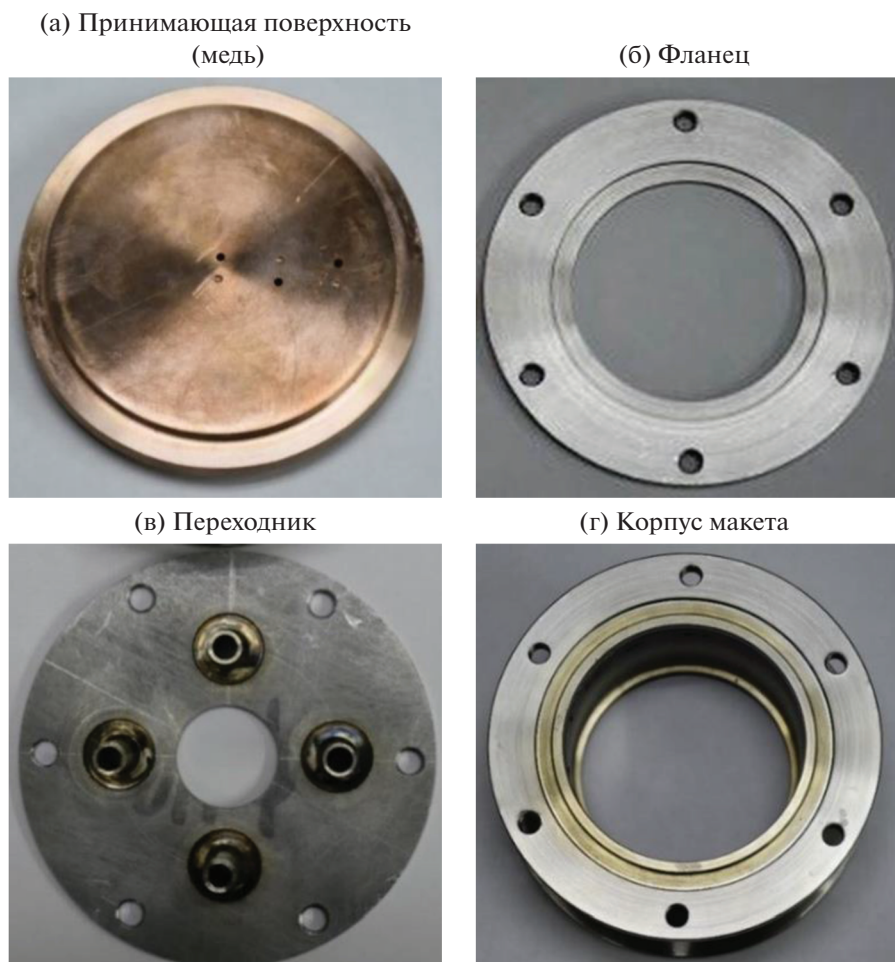


Рис. 5. Компоненты конструкции макета МЛД.

результатов тепловых испытаний. Увеличение толщины принимающей поверхности рассчитывалось исходя из соотношения (1):

$$\frac{\lambda_{\text{CPS}}}{h_{\text{CPS}}} = \frac{\lambda_{\text{M}}}{\Delta h_{\text{M}}}, \quad (1)$$

где λ_{CPS} , λ_{M} — теплопроводности материалов КПС и меди, h_{CPS} и Δh_{M} — толщина КПС и увеличение толщины принимающей поверхности (по сравнению с базовым вариантом).

Остальные конструктивные элементы макета остаются без изменений рис. 5. После изготовления основных компонентов была произведена сборка макета МЛД рис. 6. Для установки датчиков температуры типа хромель-алюмель ХА были подготовлены специальные отверстия в толще принимающей поверхности макета таким образом, чтобы первый из них находился на расстоянии не более 1 мм от нагреваемой (внешней) приемной поверхности, а последний не более 1 мм от охлаждаемой поверхности со стороны подачи теплоносителя

рис. 5а. Для поддержания одинаковой начальной температуры поверхности макета МЛД будет использоваться регулятор температур ТРМ138.

Основные технические требования конструкции макета литиевого дивертора содержат следующие положения:

- стационарный теплоотвод при тепловой нагрузке на его поверхность не менее 5 МВт/м²;
- температура приемной поверхности в рабочем режиме не должна превышать 650°C при тепловой нагрузке 5 МВт/м²;
- давление компонентов теплоносителя в трактах охлаждения МЛД не должно превышать 0.5 МПа.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

В дальнейшем для проведения испытаний с макетом МЛД была определена принципиальная схема экспериментального стенда рис. 7.



Рис. 6. Макет модуля литиевого дивертора.

Стенд состоит из следующих систем:

- газовый электродуговой плазматрон;
- газовая система;

- водяная система;
- информационно-измерительный комплекс (ИИК).

Газовый электродуговой плазматрон — предназначен для подачи варьированных плазменных нагрузок на макет МЛД в диапазоне от 0 до 5 МВт/м². Питание плазматрона осуществляется при помощи инвертора Fubag Intig 200AC/DC. Максимальный ток разряда плазматрона составляет 200 А. Расход воды и давление при охлаждении сопла плазматрона составляют 0.1 л/с, 2 атм. Расход аргона при подаче в разряд плазматрона 0.2 л/с. Давление аргона в плазматроне должно составлять 1.2 атм.

Газовая система — служит для подачи воздуха в двухфазную форсунку ВКТ SS4302+SS322-4 (с заданными параметрами давления) и расхода, и подачи аргона для формирования плазменной дуги в плазматроне. Система состоит из поршневого компрессора ЗУБР ЗКПМ-240-24-1.5 который служит для подачи воздуха в форсунку, фильтра для очистки воздуха от органических примесей, манометров ТМ-521 для контроля давления воздуха и аргона, газового ротаметра типа LZM-15ZT для варьированной подачи воздуха в форсунку, газовой рампы для хранения баллона аргона, газового расходомера предназначенного для регулируемой подачи аргона в плазматрон.

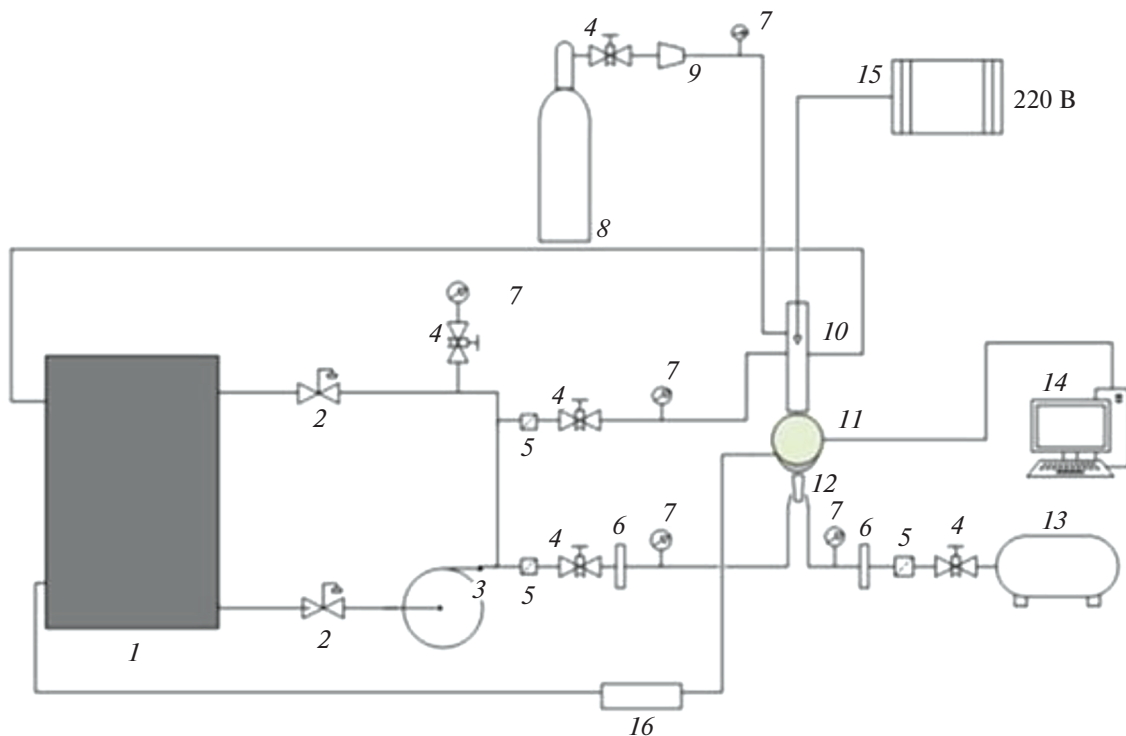


Рис. 7. Схема стенда для проведения испытаний с охлаждаемым макетом МЛД: 1 — бак собирающий; 2 — пластиковый вентиль; 3 — насос водяной; 4 — металлический вентиль; 5 — фильтр; 6 — расходомер; 7 — датчики давления; 8 — баллон аргона; 9 — натекаль; 10 — плазматрон; 11 — макет МЛД; 12 — двухфазная форсунка ВКТ форсунка; 13 — компрессор; 14 — персональный компьютер; 15 — источник питания плазматрона; 16 — калориметр.

Таблица 1. Расчетные параметры системы охлаждения тепловом потоке 5 МВт/м²

Компонент	Давление, атм.	Расход, л/час (м ³ /час)
Вода	1.5	22
Воздух	3.2	7

Водяная система — служит для подачи дистиллированной воды в двухфазную форсунку ВКТ с заданными параметрами давления и расхода, а также для охлаждения медного сопла плазмотрона в процессе формирования аргоновой плазмы. Система состоит из полиэтиленового собирающего бака, центробежного насоса Pedrollo 2CP 25/16A, служащего для подачи дистиллированной воды в форсунку, фильтра для очистки воздуха от органических примесей, манометров ТМ-521 для контроля давления воды, жидкостного ротаметра LZM-15ZT для варьированной подачи дистиллированной воды в форсунку.

Информационно-измерительный комплекс (ИИК) — служит для визуализации динамики изменения температуры макета МЛД в процессе подготовки и проведения экспериментов и архивирования данных. Система включает в себя персональный компьютер, термометры термоэлектрические типа хромель-алюмель ХА, прибор для регистрации и регулирования температур типа ТРМ138.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ОХЛАЖДАЕМОЙ
МАКЕТОМ МЛД**

С учетом предложенной схемы была разработана методика проведения экспериментов по

охлаждению макета МЛД газо-капельным потоком низкого давления в стендовых условиях. Перед проведением стендовых испытаний в процессе сборки макета литиевого дивертора на оси принимающей поверхности макета должны быть установлены кабельные термоэлектрические термометры Т_{п1} и Т_{п2} типа хромель-алюмель ХА в кожухе из нержавеющей стали. Место установки термодпары Т_{п1} должно находиться на расстоянии 1 мм от нагреваемой поверхности. Термодпара Т_{п2} должна быть установлена на расстоянии 1 мм от охлаждаемой поверхности. После установки термодпар должна быть измерена стационарная температура макета литиевого дивертора до проведения испытаний.

Алгоритм испытаний должен быть следующим:

— в начале должна быть проведена настройка параметров источника теплового потока. В разряд плазмотрона должна быть обеспечена подача аргона расходом 0.2 л/с под давлением 1.5 атм;

— затем должна быть произведена предварительная настройка рабочих параметров системы термостабилизации (давление и величина расхода жидкости и газа) в соответствии с подаваемым тепловым потоком (см. табл. 1);

— после этого должен быть произведен запуск системы термостабилизации;

— затем должна быть запущена регистрация температуры поверхности прототипа МЛД с сохранением данных на персональном компьютере. После этого происходит запуск источника теплового потока. Варьированием силы тока разряда на сварочном инверторе в интервале от 0 до 100 А должна быть обеспечена плотность теплового потока на прототипе литиевого дивертора равная 5 МВт/м²;

— испытания должны продолжаться в течение не менее 30 с после достижения стабилизации температуры поверхности макета. По истечению данного времени источник теплового потока должен быть отключен. После достижения температуры стабилизации (достижение минимального значения температуры при данных параметрах охлаждения) система охлаждения должна быть отключена. Затем должна быть прекращена регистрация температуры поверхности прототипа литиевого дивертора.

Расчетная величина расхода жидкой фазы теплоносителя $M(Q)$, поступающего в форсунку макета, определялась по следующей формуле:

$$M(Q) = \frac{QS}{\lambda}, \tag{2}$$

где S — площадь пятна нагрева макета [м²], λ — скрытая теплота испарения жидкости [ккал/г].

На основании данной формулы была получена зависимость расхода жидкой фазы ($M(Q)$, л/час)

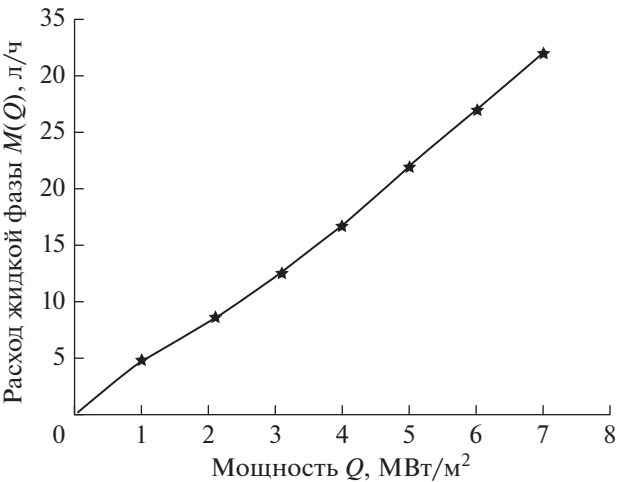


Рис. 8. Расчетный расход жидкой фазы теплоносителя в зависимости от плотности теплового потока на макет.

теплоносителя от плотности теплового потока (Q , Вт/м²) на макет рис. 8.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОТРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ОХЛАЖДЕНИЯ МАКЕТА МЛД ГАЗО-КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

На основе разработанной схемы был проведен эксперимент для подтверждения работоспособности системы охлаждения и корректности разработанной методики. В целях сохранения конструкции макета МЛД без повреждений в случае неудовлетворительной работы системы охлаждения для получения тепловой нагрузки применялся омический нагрев.

Эксперимент производился в два этапа на первом этапе производился омический нагрев имитационного макета с помощью системы высокоточного регулятора температур (ВРТ) без охлаждения парогазовой смесью при постоянной регистрации температуры в течении 200 с. Затем нагрев выключался и макет остывал естественным образом. Второй этап протекал одновременно при омическом нагреве и охлаждении газо-капельным потоком низкого давления. Охлаждение имитационного макета проводилось согласно ранее разработанной схеме стенда (рис. 7). На втором этапе предварительно была произведена установка расчетной величины необходимого расхода жидкой компоненты (22 л/час, 1.5 атм.) и изменение расхода газовой компоненты (7 м³/час, 3.2 атм.). Затем с помощью данных систем газовая и жидкая фаза подавалась в двухфазную форсунку для получения газо-капельного потока необходимого качества распыла жидкости (рис. 9).

Затем включалась система регистрации и омический нагрев макета до момента стабилизации температуры около 200 с. После этого отключался омический нагрев макета и прекращалась подача парогазовой смеси на имитационный макет. В дальнейшем макет остывал естественным образом. На следующем этапе был проведен идентичный эксперимент с охлаждением макета МЛД, но уже при пониженных параметрах охлаждения: расход жидкостной фазы составил 3 л/ч при давлении 1.5 атм., расход газовой фазы составил 3 м³/ч, при давлении 1.5 атм.

В результате были получены временные зависимости изменения температуры макета МЛД без охлаждения и при охлаждении рассчитанными и заниженными параметрами парогазовой смеси. Как видно из рис. 10 благодаря охлаждению имитационного макета газо-капельным потоком с рассчитанными параметрами с помощью двухфазной форсунки удалось понизить температуру имитационного макета на 63°C, при охлаждении газо-капельным потоком с пониженными параметрами уда-



Рис. 9. Вид факела распыла двухфазной форсункой газо-капельного потока при рассчитанных режимах работы газовой и водяной систем стенда.

лось снизить температуру лишь на 20°C. Таким образом применение газо-капельного потока с расчетными параметрами позволяет более эффективно охладить макет МЛД, что в свою очередь подтверждает работоспособность системы охлаждения и корректность методики. На основании разработанной методики в дальнейшем будет возможно получить временные зависимости температуры макета МЛД для разной плотности теплового потока плазмотрона и параметров охлаждения. Полученные результаты измерения теплового состояния макета позволят вычислить коэффициенты теплоотдачи для процесса охлаждения газо-жидкостным потоком низкого давления в зависимости от величины приходящего теплового потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы была определена конструкция макета МЛД охлаждаемого газо-капельным потоком низкого давления. Определены основные системы и схема стенда для проведения экспериментов по охлаждению макета МЛД газо-капельным потоком низкого давления. Разработана методика проведения испытаний с макетом МЛД охлаждаемого газо-капельным потоком низкого давления. Проведен эксперимент по отработке методики, охлаждения макета МЛД парогазовой смесью низкого давления в стендовых условиях. В результате были получены временные зависимости изменения температуры макета МЛД без охлаждения и при охлаждении с рассчитанными и заниженными параметрами парогазовой смеси. Проведенные эксперименты по охлаждению имитационного макета показали, что при охлаждении газо-капельным потоком с рассчитанными параметрами удалось понизить температуру имитационного макета на 63°C, при охлаждении газо-капельным потоком с заниженными параметрами удалось снизить температуру лишь на 20°C. Таким образом применение газо-капельного потока с расчетными параметрами позволяет более эф-

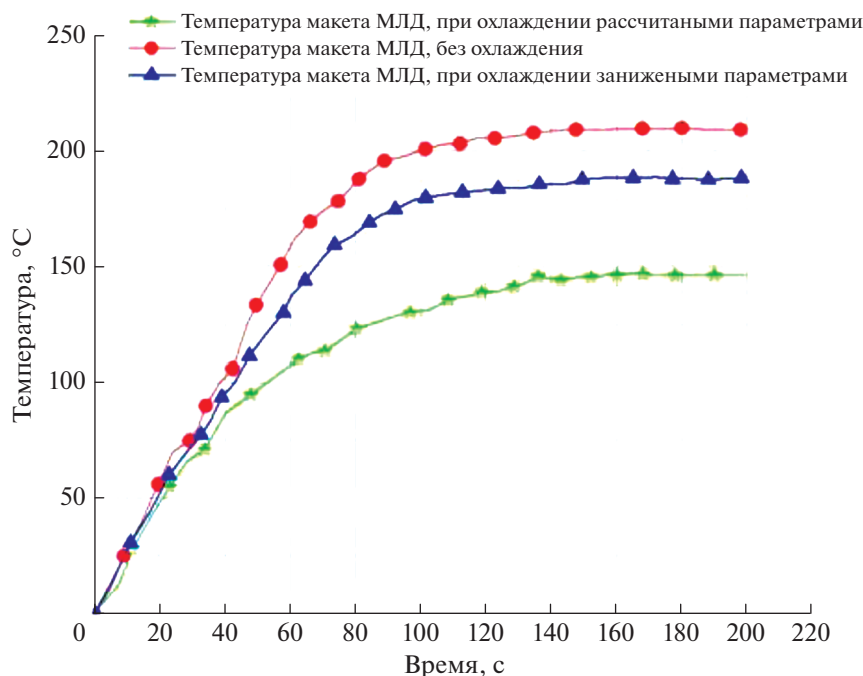


Рис. 10. Временная зависимость температуры от времени при охлаждении и без охлаждения макета МЛД.

эффективно охладить макет МЛД, что в свою очередь подтверждает работоспособность системы и корректность методики. В дальнейшем полученные результаты измерения теплового состояния макета позволят вычислить коэффициенты теплоотдачи для процесса охлаждения газо-жидкостным потоком низкого давления в зависимости от величины приходящего теплового потока от плазмотрона.

Окончательные выводы о перспективах применения газо-капельного потока в качестве теплоносителя для внутрикамерных литевых устройств можно будет сделать после проведения полноценных испытаний в условиях высоких плазменных нагрузок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполняется при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (ИРН – BR09158585 НТП “Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Tabares F. et al.* // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 1142.
2. *Federici G. et al.* // J. Nucl. Mater. 2005. V. 337–339. P. 684.
3. *Mazzitelli G. et al.* // Proc. 48th APS. 2006. P. UI1.00005.
4. *Apicella M.L. et al.* // Fusion Eng. Des. 2005. V. 75–79. P. 351.
5. *Kugel H.W. et al.* // Fusion Eng. Des. 2012. V. 87. P. 1724.
6. *van Eden G.G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116 (13) P. 135002.
7. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 1975. Москва: Машиностроение.
8. *Rindt P. et al.* // J. Nucl. Fusion. 2019. P. 15. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab0560>
9. *Nygren R.E., Tabarés F.L.* // Nucl. Mater. Energy. 2016. V. 9. P. 6. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.08.008>
10. *Evtikhin A. et al.* // J. Nucl. Mater. 1999. P. 271. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(98\)00793-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(98)00793-4)
11. *Evtikhin V.A. et al.* // Fusion Energy. 1996. P. 659.
12. *Vertkov A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81 (7). P. 1000.
13. *Morgan T.W. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60 (1). P. 014025. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa86cd>
14. *Kurnaev V. et al.* // J. Nucl. Mater. 2015. V. 463. P. 228. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076>
15. *Tulubayev Ye. et al.* // Mater. Today. 2023. V. 81. P. 1209. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.176>
16. *Vertkov A. et al.* // Fusion Eng. Des. 2017. V. 117. P. 130. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.041>
17. *Lyublinski I.E. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891 (1). P. 012152.
18. *Vertkov A.V. et al.* // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83 (7). P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1370/1/012062>
19. *Mirnov S.V. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1128. P. 012128.

Method for Investigation of the Cooling Process of a Layout of a Lithium Divertor Module (LDM) under High Energy Loads

E. Yu. Tulubaev^{1, *}, V. N. Kudiyarov², N. N. Nikitenkov², I. L. Tazhibaeva¹, A. V. Vertkov³,
M. Yu. Zharkov³, Yu. V. Ponkratov¹, Yu. N. Gordienko¹, and V. S. Bochkov¹

¹*Institute of Atomic Energy, National Nuclear Center, Republic of Kazakhstan, Kurchatov, 140000 Kazakhstan*

²*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

³*NIKIET JSC, Moscow, 107140 Russia*

**e-mail: tulubaev@nnc.kz*

Received June 19, 2023; revised June 22, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—This work is devoted to the methodology for conducting experiments to study the process of cooling by a low-pressure gas—droplet flow under conditions of high energy loads on the receiving surface of a lithium divertor module (LDM) layout. The paper describes in detail the design of the LDM model, all the main systems, parameters, and layout of the test bench. The operating modes of water and gas cooling systems have been calculated under thermal action on the LDM layout with a power equal to 5 MW/m². A description of the experiment on the development of a technique for cooling an LDM layout with a low-pressure gas—droplet flow has been given.

Keywords: LDM layout, gas—droplet flow, energy loads, technique, cooling, experimental stand