

УДК 621.039.623:634

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОНАПРЯЖЁННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ТОКАМАКА

А.В. Захаренков¹, В.Д. Локтионов^{1, 2}, А.В. Дедов¹, И.Е. Люблинский^{3, 4}, А.В. Вертков³, А.С. Демидов¹,
К.В. Журавлев¹, В.И. Польский⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций», Электрогорск, Московская обл., Россия

³АО «Красная Звезда», Москва, Россия

⁴Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Выбор метода охлаждения для энергонапряжённых объектов, таких как дивертор, лимитер и бланкет, при воздействии на них мощных тепловых потоков является одной из основных проблем во всех исследовательских термоядерных реакторах. В настоящее время эти элементы охлаждаются водой под давлением, что может вызвать серьёзные проблемы в случае аварийной ситуации, связанной с негерметичностью элементов системы охлаждения. В данной работе рассматривается альтернативный способ охлаждения таких конструктивных элементов с помощью двухкомпонентного диспергированного потока теплоносителя. На экспериментальном стенде, созданном на кафедре ОФиЯС НИУ «МЭИ», выполнено моделирование нагрева рабочего участка при условиях, близких к стационарным нагрузкам первой стенки ИТЭР. Охлаждение рабочего участка осуществляется диспергированным потоком теплоносителя по внутренней поверхности. Получено распределение температуры стенки рабочего участка по толщине. Проведена оценка теплопроводности материала рабочего участка. Показано, что предложенный метод охлаждения позволяет осуществлять эффективный теплосъём при тепловых нагрузках в диапазоне 0,7—3,2 МВт/м².

Ключевые слова: диспергированный поток, охлаждение, экспериментальные исследования, гидравлический контур, факел распыла, исследовательский модуль, индукционный нагрев, распределение температуры, теплообмен, плотность теплового потока.

APPLICATION OF DISPERSED GAS-LIQUID FLOW FOR COOLING ENERGY-STRESSED STRUCTURAL ELEMENTS TOKAMAK

A.V. Zakharenkov¹, V.D. Loktionov^{1, 2}, A.V. Dedov¹, I.E. Lyublinski^{3, 4}, A.V. Vertkov³, A.S. Demidov¹,
K.V. Zhuravlev¹, V.I. Polskiy⁴

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

²JSC Electrogorsk Research and Development Center for Nuclear Power Plants Safety, Electrogorsk, Moscow region, Russia

³JSC Red Star, Moscow, Russia

⁴National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The choice of a cooling method for energy-stressed objects, such as a divertor, limiter and blanket when exposed to powerful heat flows is one of the main problems in all research thermonuclear reactors. Currently, these elements are cooled by water under pressure, which can cause serious problems in the event of an accident related to the leakage of the elements of the cooling system. In this paper, an alternative method for cooling such structural elements using a two-component dispersed heat carrier flow is considered. On an experimental stand created at the Department of the Institute of Nuclear Power Engineering of the National Research University "MEI", a simulation of the heating of the working area was performed under conditions close to the stationary loads of the first ITER wall. The cooling of the working area is carried out by a dispersed coolant flow along the inner surface. The distribution of the wall temperature of the working section over the thickness is obtained. The thermal conductivity of the material of the working area was evaluated. It is shown that the proposed cooling method allows for effective heat removal at thermal loads in the range of 0.7—3.2 MW/m².

Key words: dispersed flow, cooling, experimental studies, hydraulic circuit, spray cone, working area, induction heating, temperature distribution, heat transfer, heat flux density.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-54-62

ВВЕДЕНИЕ

В современной технике часто возникает необходимость отведения тепловых потоков с плотностью энергии уровня нескольких МВт/м². Это характерно для таких областей, как аэрокосмические и ядерные технологии, микроэлектроника, энергетика. При этом охлаждаемые объекты по своим массогабаритным параметрам весьма разнообразны: от компактных, имеющих место в компьютерной и лазерной технике, до громоздких и объёмных, таких как, например, изделия проката сталелитейной отрасли при закалке и

охлаждения. Одним из перспективных направлений развития энергетики XXI века является освоение энергии термоядерного синтеза. В настоящее время нерешённой проблемой термоядерных реакторов является создание систем, обеспечивающих надёжное отведение тепловых потоков от таких внутрикамерных элементов, как лимитер, бланкет и дивертор. Помимо высокой плотности энергии, они имеют довольно значительные габариты.

В настоящее время отвод тепла от внутрикамерных элементов термоядерных реакторов реализуется водой под давлением. Наиболее теплонапряжёнными являются вертикальные приёмники, нижняя часть которых сконструирована из моноблоков вольфрама [1], напаянных на медную трубку. Охлаждение диверторных приёмников и приёмников пучков системы инжекции осуществляется недогретым до температуры насыщения потоком воды, закрученным с помощью вставленных на всю длину скрученных лент.

Всё сказанное заставляет искать новые эффективные методы охлаждения элементов, подвергающихся значительным тепловым нагрузкам. Одним из способов решения указанной проблемы может стать использование в качестве теплоносителя диспергированного потока теплоносителя [2, 3]. Такой теплоноситель имеет ряд преимуществ по сравнению с однофазным потоком: высокая эффективность теплоотвода за счёт теплоты испарения мелкодисперсной жидкой фазы, низкое давление, лучшая совместимость с жидким литием, меньшая склонность к возникновению кризиса теплоотдачи и т.д.

Целью данной работы являлось получение опытных данных по распределению температуры исследовательского модуля (ИМ), охлаждаемого диспергированным потоком теплоносителя через центральный канал при различных режимных параметрах компонентов, и оценка значений определяющих параметров, характеризующих процесс теплообмена в исследуемой системе.

В данной работе коллективом исполнителей решались следующие задачи:

- разработка конструкции и создание экспериментальной установки для исследования возможности охлаждения высокотемпературного исследовательского модуля диспергированным потоком теплоносителя;
- получение надёжных экспериментальных данных по распределению температуры исследовательского модуля по длине, температуры компонентов потока теплоносителя вдоль оси канала;
- оценка значений плотности теплового потока через боковую поверхность ИМ.

Решение данных задач позволяет провести первичный анализ возможности применения диспергированного потока теплоносителя для эффективного охлаждения высокотемпературной поверхности на примере вольфрамового модуля при нагрузках в диапазоне 0,7—3,2 МВт/м².

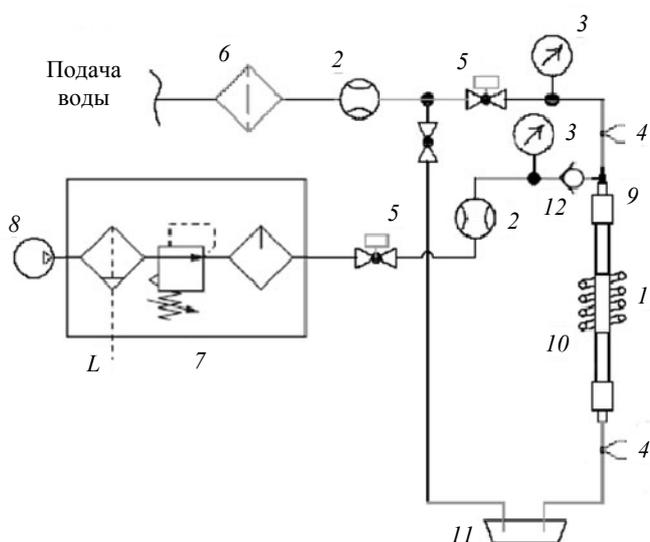


Рис. 1. Принципиальная схема системы охлаждения: 1 — исследовательский модуль; 2 — расходомеры; 3 — манометры цифровые; 4 — датчики температуры; 5 — электромагнитный клапан; 6 — механический фильтр; 7 — устройство подготовки сжатого воздуха; 8 — компрессор (баллон с газом); 9 — распыляющее устройство; 10 — индуктор; 11 — накопительный бак; 12 — обратный клапан

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

Для решения поставленной задачи в НИУ «МЭИ» на кафедре ОФиЯС была создана экспериментальная установка «Диспергированное охлаждение мишени», состоящая из трёх основных систем:

- гидравлического контура для охлаждения рабочего участка;
- системы нагрева на основе ВЧ-генератора IHS-20 мощностью до 20 кВт;
- системы сбора и обработки информации National Instruments.

На рис. 1 показана принципиальная схема гидравлического контура для охлаждения исследовательского модуля как однофазным потоком (дистиллированная вода), так и двухкомпонентным дисперсным потоком теплоносителя.

Контур охлаждения работает следующим образом. Подача дистиллированной воды в ИМ 1 осуществляется насосом из бака с дистиллированной водой. Для контроля расхода, давления и температуры воды и газа используются цифровые расходомеры 2 с возможностью регулировки, манометры 3 и термопары 4 типа ХА. Поступление компонентов в распыливающее устройство обеспечивается электромагнитными клапанами 5. Для очистки компонентов от механических примесей и их подготовки используются фильтр 6 и узел воздухоподготовки 7. Необходимое давление воздуха обеспечивается компрессором 8 или баллоном с газом. В зависимости от режимных параметров компонентов на выходе из распыливающего устройства 9 образуется двухфазная смесь воды и газа с распределением капель воды по размеру и скоростям. Диспергированный поток поступает в канал, где охлаждает внутреннюю поверхность ИМ 1, нагреваемого индуктором 10 высокочастотного генератора, после чего поступает в накопительный бак 11. Для предотвращения попадания воды в газовую магистраль используется обратный клапан 12.

Общий вид созданной экспериментальной установки с установленным оборудованием показан на рис. 2.

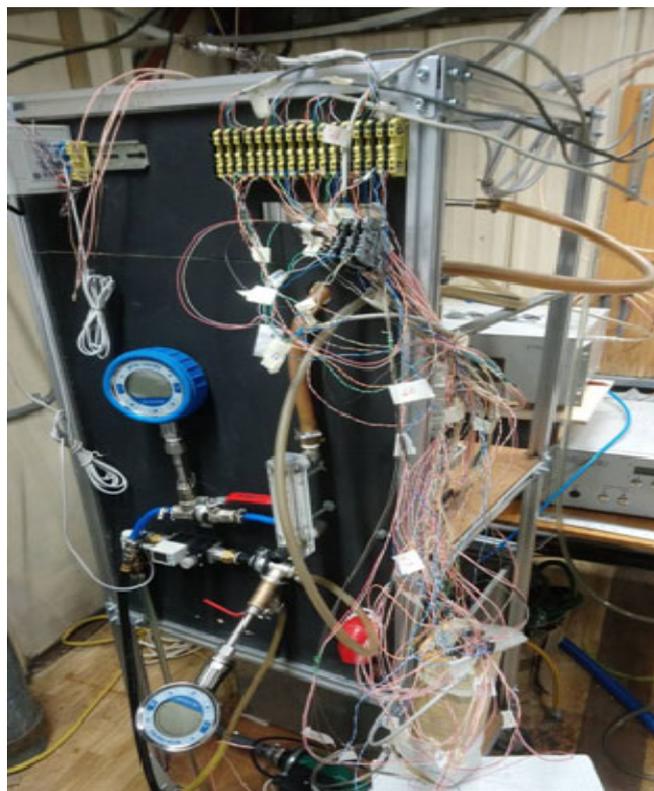


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Для формирования диспергированного потока авторами была разработана конструкция пневматического распыливающего устройства. Распыливающее устройство включает в себя сопло распыла жидкости 1, внешний корпус форсунки 2, узлы подачи воды 3 и воздуха 4, турбулизаторы компонентов диспергированного потока 5, а также фиксирующие 6 и уплотнительные 7 элементы. Схема изготовленного устройства показана на рис. 3.

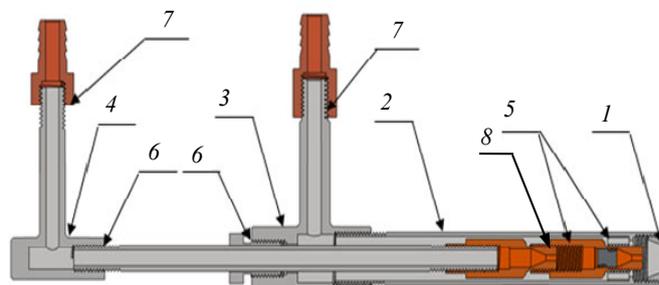


Рис. 3. Схема распыливающего устройства: 1 — сопло распыла жидкости; 2 — внешний корпус форсунки; 3 — узел подачи воздуха; 4 — узел подачи воды; 5 — турбулизаторы компонентов диспергированного потока; 6 — фиксирующие элементы; 7 — элементы уплотнений; 8 — сменная форсунка

Параметры диспергированного потока, формируемого распыливающим устройством, следующие:

- используемые компоненты: вода (дистиллированная вода), воздух (неагрессивные или инертные газы N_2 , Ar);
- избыточное давление компонентов: $p_{\text{воды}} = (0,1—5,0)10^5$ Па, $p_{\text{возд}} = (0,1—8,0)10^5$ Па;
- объёмный расход компонентов: $Q_{\text{воды}} = (6,5 \cdot 10^{-6}—7,0 \cdot 10^{-5})$ м³/с, $Q_{\text{возд}} = (2,8 \cdot 10^{-4}—2,2 \cdot 10^{-3})$ м³/с;
- диаметр капель воды в потоке: $d_k = 10—100$ мкм;
- угол раскрытия струи $\alpha = 7—13^\circ$.

Разборная конструкция, сменные сопла, а также подвижный шток позволяют изменять угол раскрытия струи факела распыла и размер капель. Конструкция форсунки спроектирована таким образом, чтобы внутренний диаметр охлаждаемого канала мог варьироваться в диапазоне $d_y = 16,0—24,0$ мм.

В качестве ИМ, моделирующего охлаждаемую поверхность, использовался цилиндрический блок из сплава вольфрама ($\approx 90\%$) и меди ($\approx 10\%$). Выбор данного материала обусловлен, с одной стороны, высокой термостойкостью за счёт использования вольфрамовой матрицы, с другой стороны, возможностью его механической обработки и достаточно высоким значением коэффициента теплопроводности благодаря

примесям меди. Исследовательский модуль имел следующие габаритные размеры: длина 98,0 мм, внешний диаметр 52,0 мм, внутренний диаметр 18,0 мм.

Для определения температурного поля в нижнем и верхнем торцах ИМ сверлением были выполнены отверстия диаметром 1,3 мм для установки термопар типа хромель-алюмель (ХА). Глубина отверстий составляла от 15 до 17 мм. Для определения температуры стенки исследовательского модуля на его поверхности установлены четыре термопары того же типа. Установленный в индукторе обогреваемый ИМ и схема расположения термопар на обогреваемом исследователском модуле показаны на рис. 4.

Для определения локальных значений температуры в канале ИМ компонентов диспергированного потока был спроектирован и изготовлен термопарный зонд, состоящий из трёх термопар диаметром 0,5 мм, смонтированных на специальном каркасе, позволяющем одновременно перемещать эти термопары по длине канала в течение эксперимента. Причём измерительные спаи двух крайних термопар располагались на расстоянии 1,5 мм от внутренней поверхности охлаждаемого канала, а третья термопара располагалась на его продольной оси. Конструкция зонда показана на рис. 5.

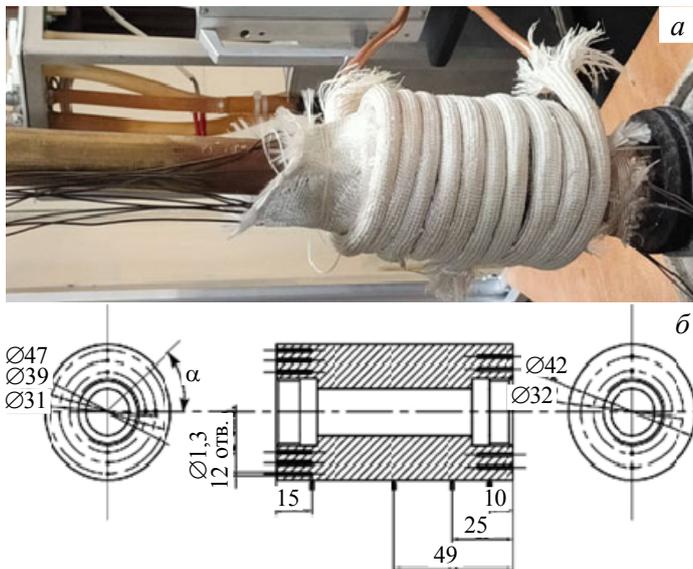


Рис. 4. Установленный в индукторе обогреваемый исследовательский модуль (а) и схема расположения термопар на торцевых поверхностях ИМ (б)

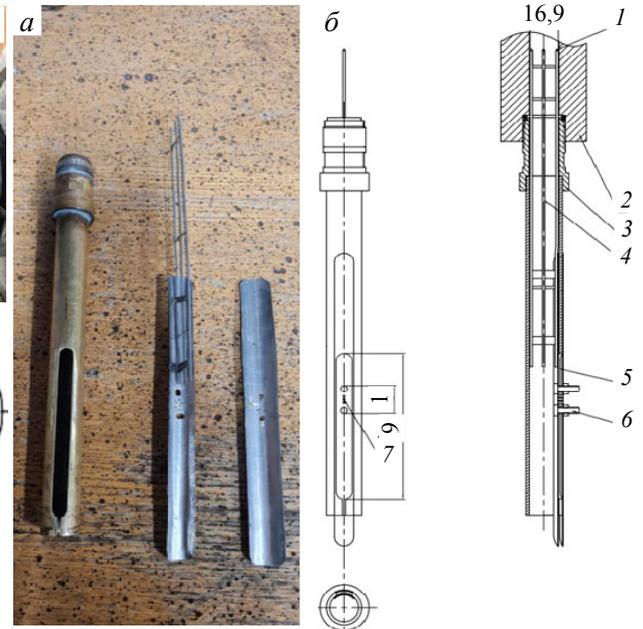


Рис. 5. Общий вид (а) и схема размещения термопарного зонда в рабочем участке: 1 — королёк термопары; 2 — обогреваемый исследовательский модуль; 3 — нижний штуцер; 4 — армирующая трубка; 5 — корпус зонда; 6 — рычаг для перемещения термопар; 7 — отверстия под вывод термопар (б)

Данное конструктивное исполнение и малые габариты зонда позволяют ему плавно перемещаться вдоль оси канала, что даёт возможность измерять значения температуры охлаждающей среды внутри канала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проверки работоспособности и апробации разработанной экспериментальной установки была выполнена серия методических опытов, а также ряд исследовательских экспериментов.

В частности, были проведены несколько серий испытаний распыливающего устройства (РУ) при различных вариантах его конфигурации, что достигалось путём комбинирования различных по геометрии выходных сопел устройства (см. рис. 3, поз. 1) с различным расположением форсунок (см. рис. 3, поз. 8) относительно выходного сечения выходного сопла распыливающего устройства.

Для каждой из рассматриваемых конфигураций конструкции РУ определялись расходные характеристики диспергированного потока и оценивались параметры факела распыла (форма и угол его раскрытия, дисперсность капель). Основной целью данных экспериментов являлось получение первичных данных о влиянии режимных параметров (давления и значения расходов воды и воздуха) компонентов на структуру диспергированного потока. Для определения линейных размеров факела распыла использова-

лась координатная сетка (рис. 6). В качестве примера на рис. 6 показаны фотографии факела в зависимости от режимных параметров компонентов диспергированного потока в одной из установленных конфигураций сопла (см. рис. 3, поз. 1) и форсунки (см. рис. 3, поз. 8).

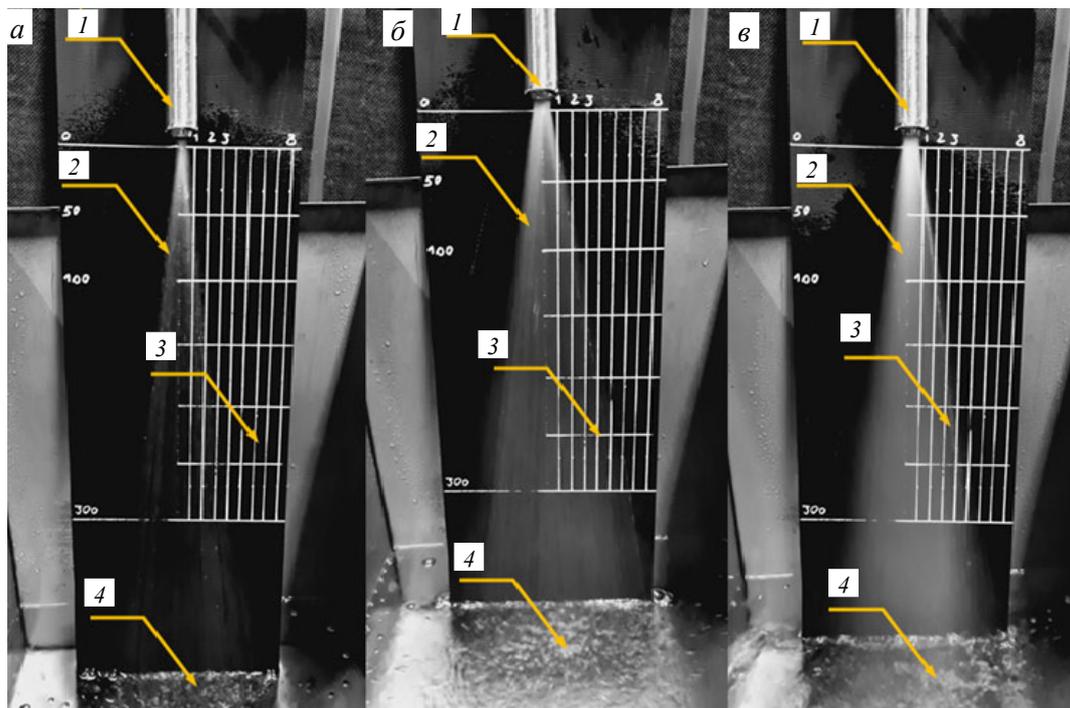


Рис. 6. Фотографии факела распыла (1 — распыливающее устройство; 2 — факел распыла; 3 — координатная сетка; 4 — приемное устройство): а — режим № 1 ($Q_{\text{воды}} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{возд}} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $p_{\text{воды}} = 33,5 \text{ кПа}$, $p_{\text{возд}} = 804,1 \text{ кПа}$); б — режим № 2 ($Q_{\text{воды}} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{возд}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $p_{\text{воды}} = 122,0 \text{ кПа}$, $p_{\text{возд}} = 904,1 \text{ кПа}$); в — режим № 3 ($Q_{\text{воды}} = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{возд}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, $p_{\text{воды}} = 256,4 \text{ кПа}$, $p_{\text{возд}} = 827,3 \text{ кПа}$)

Расходные характеристики распыливающего устройства в конфигурации, которая использовалась в дальнейших экспериментах в данной работе, показаны на рис. 7.

С целью подтверждения теплофизических характеристик (коэффициента теплопроводности) используемого вольфрам-медного сплава, из которого был изготовлен ИМ, были выполнены опыты со специальной контрольной вставкой (рис. 8) из меди (марка М0), которая устанавливалась в канал охлаждения и герметизировалась. Медная вставка внутри имела центральный канал для подвода охлаждающей воды. Для минимизации термического сопротивления по поверхности контакта боковая поверхность контрольной вставки покрывалась оловом и фиксировалась в канале. Для определения температуры в контрольной вставке использовались предварительно калиброванные термопары типа ХА, координаты установки, показаны на рис. 8.

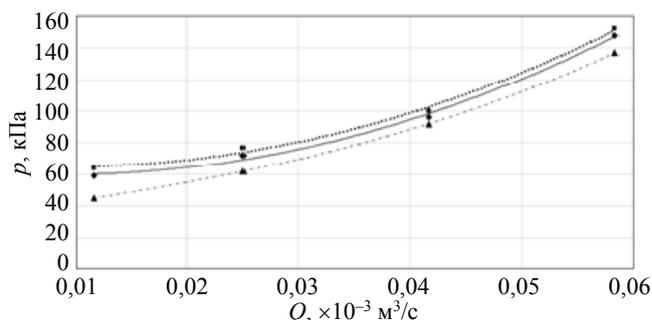


Рис. 7. Зависимость избыточного давления от объемного расхода дистиллированной воды в диспергированном потоке: ■ — $Q_{\text{возд}} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$; ◆ — $Q_{\text{возд}} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$; ▲ — $Q_{\text{возд}} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$

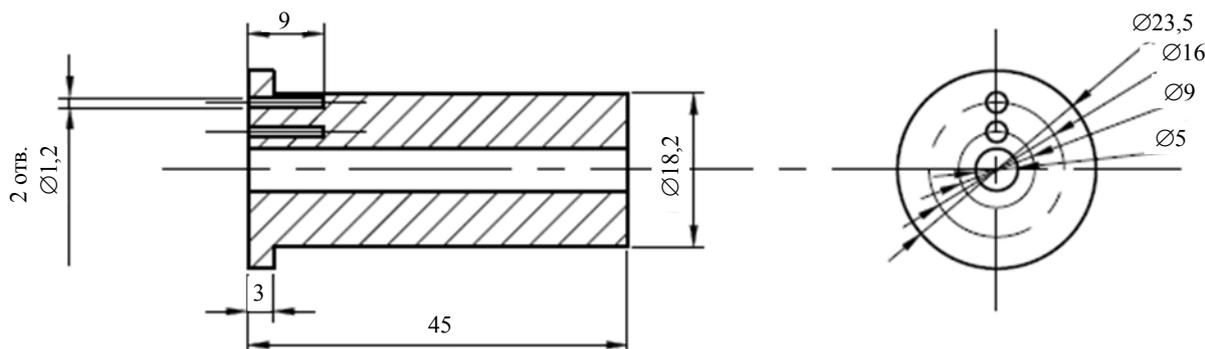


Рис. 8. Эскизный чертёж медного тестового образца

Для охлаждения тестового образца использовалась дистиллированная вода. Эксперименты проводились при нескольких значениях массового расхода воды и различной подводимой мощности, причём параметры подбирались таким образом, чтобы предотвратить кипение на внутренней поверхности центрального канала медной вставки. Проведя оценку тепловых потерь в исследуемом диапазоне температуры, авторами был установлен процент количества теплоты, передаваемой медной контрольной вставке от исследовательского модуля через боковую поверхность, что в дальнейшем позволило рассчитать значение коэффициента теплопроводности исследовательского модуля. Полученное значение составило $\lambda = 195 \text{ Вт/(м·К)}$. Эксперименты показали, что данный материал обладает значительным коэффициентом теплопроводности благодаря меди в составе сплава и высокой температурой плавления, которая присуща вольфраму ($t_{\text{пл}} \approx 1700 \text{ °C}$).

На следующем этапе исследований были выполнены эксперименты с ИМ на установке, созданной авторами работы. Далее представлены предварительные результаты серии экспериментов, в которых исследовался процесс охлаждения ИМ, нагреваемого с помощью высокочастотного генератора электрической мощностью $N_{\text{эл}} = 12 \text{ кВт}$.

Целью первой серии экспериментов, выполненных в рамках этого этапа исследований, являлось определение влияния объёмного расхода жидкостного компонента диспергированного потока на температурное поле в ИМ. Эксперименты выполнялись для трёх различных значений объёмного расхода дистиллированной воды ($Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5}; 3,3 \cdot 10^{-5}; 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$) при одном и том же значении объёмного расхода воздуха $Q_{\text{возд}} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Температура воды, подаваемой в распыливающее устройство, имела значение $T_{\text{вод_вх}} = 3,0\text{--}6,0 \text{ °C}$, а значение температуры воздуха варьировалось в диапазоне $T_{\text{возд_вх}} = 24,0\text{--}26,0 \text{ °C}$. В процессе каждого эксперимента выполнялось измерение температурного поля исследуемого модуля с помощью термопар, установленных в соответствии с рис. 4. Внешняя поверхность ИМ была теплоизолирована от внешней окружающей среды несколькими слоями стеклоткани толщиной 0,5 мм. Для измерения температурного поля компонентов диспергированного потока внутри охлаждаемого канала использовался зонд, конструкция которого показана на рис. 5. Измерение температурного поля среды внутри канала в процессе экспериментов выполнялось для различных сечений по высоте (z) канала. Причём за начальное положение ($z = 0$) зонда принимался уровень верхнего торца ИМ.

Изменения температуры теплоносителя внутри канала в различных сечениях по его длине (z) для указанных экспериментов показаны на рис. 10. Кривые 1—3 (рис. 9) соответствуют температуре теплоносителя (T_w), измеренной вблизи поверхности канала, а кривые 4—6 соответствуют температуре теплоносителя (T_{ax}), измеренной на продольной оси канала в каждом из этих сечений.

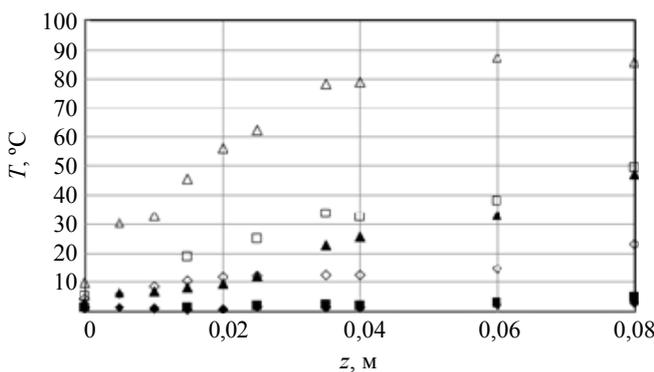


Рис. 9. Распределение температуры теплоносителя вблизи стенки (T_w) и на оси (T_{ax}) по длине канала охлаждения исследуемого образца ($Q_{\text{возд}} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$) соответственно: \diamond, \blacklozenge (1, 4) — $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; \square, \blacksquare (2, 5) — $Q_{\text{вод}} = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; Δ, \blacktriangle (3, 6) — $Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

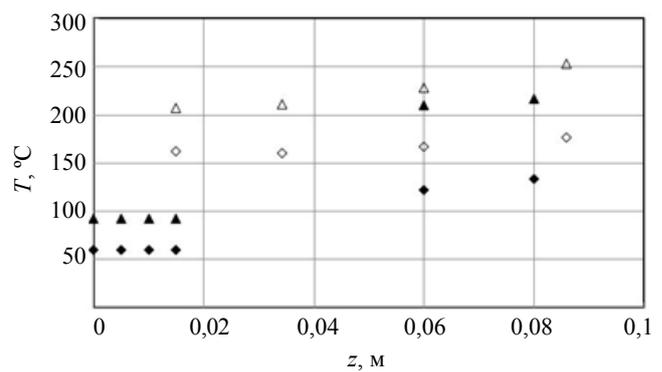


Рис. 10. Изменение по длине (z) исследовательского модуля температуры внешней (T_{out}) поверхности рабочего участка и температуры на внутренней поверхности (T_{in}) охлаждаемого канала при различном расходе жидкой фазы в охлаждаемой среде ($Q_{\text{возд}} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$) соответственно: \diamond, \blacklozenge (1, 3) — $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; Δ, \blacktriangle (2, 4) — $Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$

На графике видно, что в случае объёмного расхода воды, равного $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ (кривые 1, 4), наблюдается незначительное увеличение температуры теплоносителя по длине охлаждаемого канала. Максимальная разница в значениях температуры теплоносителя на продольной оси и вблизи поверхности канала не превышает 10 °C в выходном сечении $z = 80 \text{ мм}$ (см. рис. 9). Значительное изменение тем-

пературы теплоносителя вблизи поверхности канала (1) наблюдается по длине канала для сечений с продольной координатой (z) свыше 35 мм. Температура охлаждающей среды на продольной оси (4) канала в рассматриваемом случае равномерно увеличивается от $t = 3,0$ °С до $t = 4,0$ °С.

Уменьшение объёмного расхода воды в диспергированном потоке с $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с (кривые 1, 4) до $Q_{\text{вод}} = 3,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с (кривые 2, 5 на рис. 10) привело к существенному (двукратному) увеличению температуры теплоносителя вблизи поверхности канала (2), значение которой достигает $t = 25$ °С на выходе из канала. При этом температура теплоносителя в центре потока (кривая 4) увеличилась незначительно по сравнению с предыдущим случаем, а значение этой температуры не превышало $t = 5$ °С на выходе из канала.

Уменьшение объёмного расхода воды в диспергированном потоке до $Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с привело к значительному росту температуры теплоносителя по длине канала (кривые 3, 6 на рис. 9), при этом рост температуры теплоносителя наблюдается как вблизи поверхности канала (3), так и в центральной части потока (6). На выходе из обогреваемого канала значения температуры теплоносителя вблизи поверхности канала и в центре потока превышали значения $t = 80$ °С (кривая 3) и $t = 45$ °С (кривая 6) соответственно. При этом в рассматриваемом эксперименте на выходе из рабочего участка наблюдался интенсивный выход паровой фазы.

Изменения температуры на внешней поверхности ИМ и на внутренней поверхности охлаждаемого канала при различных уровнях объёмного расхода воды показаны на рис. 10.

Значения температуры на внешней поверхности T_{out} (1, 2 на рис. 10) ИМ соответствуют опытным данным, измеренным в процессе экспериментов с помощью термопар типа ХА, закреплённых на наружной поверхности. Значения температуры на внутренней поверхности канала T_{in} (3, 4 на рис. 10) определялись расчётным путём, используя показания термопар, вмонтированных в ИМ с нижнего и верхнего торцов.

При расчёте температурного поля по толщине ИМ предполагалось, что распределение температуры по толщине стенки (в радиальном направлении) подчиняется известному соотношению

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2, \quad (1)$$

где C_1 и C_2 — неизвестные числовые коэффициенты. Коэффициенты C_1 и C_2 определялись расчётным путём на основе значений температур, измеренных экспериментально в области верхней и нижней торцевых поверхностей ИМ с помощью вмонтированных термопар (см. рис. 4).

Анализ результатов, показанных на рис. 10, позволяет установить ряд особенностей в поведении изучаемых процессов. Так, уменьшение расхода воды с $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с (1 на рис. 10) до $Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с (2 на рис. 10) привело к возрастанию примерно в 1,5 раза температуры внешней поверхности исследовательского модуля. Максимальное значение температуры внешней поверхности вставки наблюдается в её нижней части, в области выходного сечения. Для величин расхода воды, равных $Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с и $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с, значения температуры внешней поверхности ИМ в её нижнем сечении около $t_{\text{out}} = 240$ °С и $t_{\text{out}} = 170$ °С соответственно.

На рис. 11 показаны результаты расчётного определения плотности теплового потока, подводимого к внутренней поверхности канала при различных значениях величины объёмного расхода воды. Значения плотности теплового потока, подводимого через боковую поверхность ИМ, определялись, исходя из предположения, что распределение температуры по толщине стенки (в радиальном направлении) подчиняется известному соотношению (1).

При расчётном определении величины плотности теплового потока принималось, что величина коэффициента теплопроводности материала вставки имела значение, равное $\lambda = 195$ Вт/(м·К). Величина плотности подводимого теплового по-

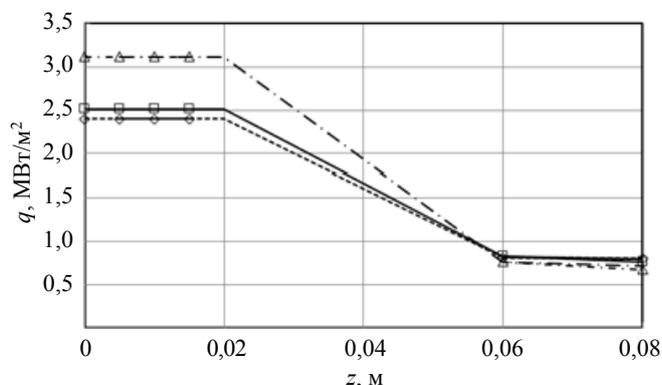


Рис. 11. Изменение плотности теплового потока (q) на внутренней поверхности канала при разных объёмных расходах воды ($Q_{\text{вод}} = 8,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с): 1 (◇) — $Q_{\text{вод}} = 5,8 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 2 (□) — $Q_{\text{вод}} = 3,3 \cdot 10^{-5}$ м³/с; 3 (△) — $Q_{\text{вод}} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с

тока (закон Фурье для случая цилиндрической стенки) определялась на основе значений температур, измеренных термопарами, установленными в области верхнего и нижнего торцов вставки, а также на её внешней поверхности.

Как следует из результатов, показанных на рис. 11, наибольшие значения плотности подводимого через боковую поверхность ИМ теплового потока наблюдаются в верхней части вставки, где эти значения достигают величины $q = 2,4\text{—}3,2$ МВт/м². При этом в нижней части поверхности канала (в сечениях с продольной координатой больше $z = 60$ мм) значения плотности теплового потока варьируются в диапазоне $q = 0,7\text{—}0,85$ МВт/м². Можно предположить, что такая неравномерность распределения плотности теплового потока по длине канала объясняется ухудшенными условиями теплоотдачи в нижней части поверхности канала за счёт того, что в эту область поступает меньшее количество жидкой фазы диспергированного потока. Это может быть связано с используемой схемой подачи охлаждающей среды, а также за счёт уменьшения количества жидкостного компонента («осушения») в диспергированном потоке с увеличением продольной координаты z вследствие кипения жидкой фазы при её движении по каналу вставки.

ВЫВОДЫ

В результате данной работы:

- создана новая экспериментальная установка для исследования возможности охлаждения высокотемпературного исследовательского модуля диспергированным потоком теплоносителя;
- получены первые экспериментальные данные по распределению температуры исследовательского модуля по длине, температуры компонентов потока вдоль оси канала;
- выполнена оценка значений плотности подводимого теплового потока на внутренней поверхности канала охлаждения.

Первичный анализ полученных экспериментальных данных показывает, что предложенный способ охлаждения исследовательского модуля позволяет эффективно снимать тепловые нагрузки до 4 МВт/м², при этом наблюдалась существенная неравномерность распределения плотности теплового потока по длине охлаждаемого канала. Максимальные значения температуры ИМ не превышают 230—250 °С, что позволяет с оптимизмом оценивать возможности предложенного способа охлаждения. Полученные предварительные результаты показали, в частности, что существенное влияние на процесс охлаждения нагретой поверхности канала оказывает величина объёмного содержания жидкой фазы в диспергированном потоке.

В то же время при данных режимных параметрах компонентов недостаточное количество массы дистиллированной воды в диспергированном потоке при движении и кипении в канале охлаждения ИМ приводит к тому, что в нижней части канала происходит ухудшение режима теплосъёма с поверхности канала вследствие «осушения» охлаждающей среды и др.

Очевидно, что в дальнейшем необходимо выполнить более углублённый анализ влияния степени фрагментации жидкой фазы и размеров капель дистиллированной воды, а также корректировку угла распыла форсунки на температурное поле исследовательского модуля. Кроме того, представляет интерес оценить величину коэффициента теплоотдачи при использовании подобных схем охлаждения нагретых поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (соглашение № 19-79-00271 от 30.07.2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lorenzetto P., Banetta S., Bellin B. et al.** EU contribution to the procurement of the ITER blanket first wall. — Fusion Engineering and Design, 2016, vol. 109—111, Part A, p. 661—665.
2. **Hirai T., Barabash V., Escourbiac F., Durocher A., Merola M.** ITER divertor materials and manufacturing challenges. — Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 125, p. 250—255.
3. **Lyublinski I.E., Mirnov S.V., Komov A.T. et al.** Innovative method of cooling and thermostabilization of tokamak elements with capillary-porous structures. — J. of Physics: Conf. Series, 2017, vol. 891(1), p. 012152.
4. **Вертков А.В., Комов А.Т., Люблинский И.Е., Мирнов С.В., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Фрик П.Г.** Применение диспергированного газожидкостного потока для охлаждения жидкометаллического лимитера токамака Т-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 51—58.



Александр Валентинович Захаренков, к. техн. н., доцент; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Москва, Красноказарменная ул. 14, Россия
zaharenkov.aleks@mail.ru



Владимир Дмитриевич Локтионов, в.н.с., к. техн. н.; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Москва, Красноказарменная ул. 14, Россия; заместитель директора по научной работе, начальник Управления НИР и НИОКР; АО «ЭНИЦ», 142530 МО, Электрогорск, ул. Святого Константина 6, Россия
haevec@yandex.ru



Алексей Викторович Дедов, заведующий кафедрой, директор Института тепловой и атомной энергетики, д. техн. н., член-корреспондент РАН; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Россия
dedovav@mpei.ru



Игорь Евгеньевич Люблинский, начальник отдела, к. техн. н.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1а, Россия; доцент; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
lyublinski@yandex.ru



Алексей Викторович Вертков, главный специалист, к. техн. н.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1а, Россия
avertkov@yandex.ru



Андрей Сергеевич Демидов, техник 1-й категории, студент; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Москва, Красноказарменная ул. 14, Россия



Кирилл Вячеславович Журавлев, техник 1-й категории, студент; ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250 Москва, Красноказарменная ул. 14, Россия



Валерий Игоревич Польский, доцент, к.ф.-м.н.; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия

Статья поступила в редакцию 16 марта 2021 г.

После доработки 14 июля 2021 г.

Принята к публикации 28 сентября 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4, с.54—62.