

УДК 621.039.6

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕРГИРОВАННОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИМИТЕРА ТОКАМАКА Т-10

*А.В. Вертков³, А.Т. Комов¹, И.Е. Люблинский^{3, 4}, С.В. Мирнов^{1, 2}, А.Н. Варав¹,
А.В. Дедов¹, А.В. Захаренков¹, П.Г. Фрик^{1, 5}*

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, Россия

³АО «Красная Звезда», Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁵Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

Рассматривается способ температурной стабилизации жидкометаллического лимитера токамака Т-10 с капиллярно-пористой структурой со стороны, обращенной к плазме и насыщенной жидким литием, диспергированным газожидкостным потоком. Факел распыла, формируемый генератором спрея, направлен вдоль оси лимитера. Приведены результаты предварительных опытов по определению геометрических характеристик факела, диспергированного потока, распределения скорости и размеров капель воды в зависимости от давления воды и воздуха, поступающих в форсунку генератора. Представлена разработанная авторами методика обработки экспериментальных данных, позволяющая рассчитать плотность теплового потока, температуру на внешней (обогреваемой) и внутренней (охлаждаемой) поверхности стенок мишени. Разработана конструкция рабочего участка — имитатора лимитера. Экспериментально установлено резкое понижение температуры мишени при подаче воздуха к форсунке генератора. Основные эксперименты проводились при избыточных давлениях воды $(0,5—1,0)10^5$ Па, воздуха $(0,3—2,8)10^5$ Па и подводимых к мишени плотностях теплового потока до $4,9$ МВт/м².

Ключевые слова: лимитер, термоядерный реактор, литий, капиллярно-пористые системы, система охлаждения, газовойодной спрея, экспериментальные исследования, теплообмен, коэффициент теплоотдачи.

THE USE OF DISPERSED GAS-LIQUID FLOW FOR COOLING OF THE TOKAMAK T-10 LIQUID METAL LIMITER

*A.V. Vertkov³, A.T. Komov¹, I.E. Lyublinski^{3, 4}, S.V. Mirnov^{1, 2}, A.N. Varava¹, A.V. Dedov¹,
A.V. Zaharenkov¹, P.G. Frick^{1, 5}*

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

²JSC «SRC RF TRINITI», Troitsk, Moscow, Russia

³JSC «Red Star», Moscow, Russia

⁴National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

⁵Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

A method of temperature stabilization of the tokamak T-10 limiter with capillary-porous structure on the plasma facing side saturated with liquid lithium that is dispersed with gas-liquid flow is considered. The spray cone, formed by the spray generator, is directed along the axis of the limiter. The results of preliminary experiments for determining the geometric characteristics of a torch, a dispersed flow, the distribution of the velocity and the size of water droplets in dependence on the pressure of water and air entering the generator nozzle are presented. The technique developed by the authors for processing experimental data is presented, which makes it possible to calculate the density of the heat flux, the temperature on the outer (heated) and internal (cooled) surface of the target walls. The design of the working area — limiter simulator is developed. It was experimentally established that the temperature of the target sharply decreased when air was supplied to the generator nozzle. The main experiments were carried out at excess pressures of water $(0.5—1.0)10^5$ Pa, and air $(0.3—2.8)10^5$ Pa, and heat flux densities up to 4.9 MW/m² applied to the target.

Key words: limiter, thermonuclear reactor, lithium, capillary-porous systems, cooling system, gas-water spray, experimental investigation, heat transfer, heat-transfer coefficient.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-51-58

ВВЕДЕНИЕ

Конструктивные элементы первой стенки термоядерного реактора подвергаются разрушительному воздействию высокотемпературной плазмы энергией десятки кэВ, электромагнитного и теплового излучения. Всё это приводит к деградации структуры и распылению материала первой стенки. На ранней стадии исследований по управляемому термоядерному синтезу считалось, что для решения проблемы первой стенки достаточным будет применение тугоплавких материалов, таких, например, как вольфрам.

Однако в настоящее время перспективы применения тугоплавких материалов становятся всё менее очевидными из-за крайне негативных последствий попадания в плазму атомов с большим Z .

В последние годы в России достаточно интенсивно проводятся исследования возможности применения в качестве конструктивных элементов, обращённых к плазме реактора (РФС-компонентов), материалов с малым Z , в частности, капиллярно-пористых структур (КПС), насыщенных жидким литием [1—4], которые позволяют самовосстанавливаться в ходе длительной эксплуатации вплоть до стационарного режима работы. В качестве примера такого РФС-компонента, подлежащего охлаждению, авторы выбрали лимитер токамака, геометрически подобный лимитеру токамака Т-10 с жидким литием. Описание лимитера токамака Т-10 с жидким литием приведено в [4].

Основные параметры литиевого лимитера:

Максимальная плотность теплового потока, МВт/м ² . . .	5
Размер лимитера $H \times D \times L$, мм . . .	95×450×48
Длина литиевого элемента, мм . . .	323
Диаметр литиевого элемента, мм . . .	34
Площадь поверхности, занимаемой литием, см ² . . .	324
Радиальное перемещение лимитера $r_1—r_2$, мм . . .	150
Рабочая температура, °С . . .	200—550
Мощность нагревателя, Вт . . .	500
Количество лития, г/см ³ . . .	~50 (100)

Важной проблемой, возникающей при использовании литиевых капиллярно-пористых систем, является их эффективное охлаждение. В настоящее время экспериментальные исследования по охлаждению литиевых КПС перегретой водой под давлением показали хорошие результаты [5—7]. Несмотря на это, такой подход можно рассматривать только для небольших исследовательских систем из-за высокой потенциальной опасности повреждения системы охлаждения в условиях токамака, что недопустимо для стационарно работающих установок. Чтобы решить проблему высокого давления в качестве альтернативы системе теплоносителя, было предложено использовать для снятия тепла легкоплавкий металл с высокой температурой кипения. Проведённые испытания модуля литиевого дивертора на токамаке КТМ с расплавом Na—К подтвердили его расчётные параметры [8].

Однако при очевидных достоинствах охлаждения литиевого элемента легкоплавким металлом — низкое давление в теплообменной системе, высокие теплопереносящие свойства жидкометаллического теплоносителя [9], отсутствие отрицательных явлений в ситуациях, когда теплоноситель взаимодействует с жидким литием, такой подход также имеет свой существенный недостаток. Он заключается в технологических особенностях эксплуатации системы с Na—К-теплоносителем, связанных с чрезвычайно высокой химической активностью этого расплава и низкой температурой его затвердевания (в случае аварийной разгерметизации тракта охлаждения жидкий металл будет разливаться беспрепятственно). Нельзя забывать и о явлении МГД-сопротивления, возникающем при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле [10].

Всё сказанное побуждает искать инновационные подходы к решению проблемы охлаждения литиевых КПС применительно к использованию их для термостабилизации внутрикамерных элементов токамаков, работающих в стационарном режиме.

Таким подходом может стать охлаждение внутрикамерных устройств токамака и в том числе лимитеров на основе литиевых КПС мелкодисперсной смесью воды и газа с низкими значениями давления в системе охлаждения. При таком подходе выполняются следующие требования: система работает при низком давлении, удельное объёмное содержание воды в теплоносителе не превышает 10% и может регулироваться, конструктивно система проста и может быть изготовлена из обычных нержавеющей сталей аустенитного класса типа X18H10T.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по охлаждению диспергированным потоком газа и дистиллированной воды рабочего участка, моделирующих условие одностороннего нагрева модели лимитера, а также первые результаты по изучению факела распыла газозводяного спрея и оценке эффективности этого метода охлаждения на модели такого лимитера.

ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФАКЕЛА РАСПЫЛА

Авторами была разработана конструкция генератора диспергированного газожидкостного факела (спрея), схема которой изображена на рис. 1.

С целью изучения характеристик факела распыла (угол раскрытия, характер распределения скорости и массы воды по сечению факела, форма и размер распыляемых капель и т.д.) и характеристик потоков воды и газа была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 2).

На рис. 3 в качестве примера представлена фотография диспергированного газожидкостного факела в одном из исследуемых режимов.

Визуальное наблюдение, качественные результаты режимов работы генератора спрея помогли определить режимы, при которых обеспечивается формирование устойчивого факела распыла с необходимыми параметрами.

Детальное исследование структуры факела было выполнено с помощью стандартной системы двухмерной цифровой трассерной анемометрии, включающей спаренный импульсный лазер, систему формирования светового ножа, систему синхронизации и цифровую камеру. Световой нож выделяет плоскость, проходящую через ось факела. Лазер генерирует два импульса с заданной задержкой по времени. Камера регистрирует два соответствующих изображения частиц в плоскости светового ножа. Всё регистрируемое поле разбивается на ячейки (опросные области), внутри которых вычисляется корреляция изображений частиц на паре снимков и по максимуму коэффициента корреляции определяется среднее для данной ячейки значение двумерного вектора смещения в плоскости, перпендикулярной лучу зрения камеры. Оптические методы исследования газочапельных потоков получили существенное развитие в последние 10 лет и позволяют не только восстанавливать структуру поля скорости капель, но и оценить их размеры [11]. Были изучены три режима, характеристики которых представлены в таблице. Первый режим характеризуется умеренными давлением и расходом. Во втором режиме расход тот же, но увеличено давление воздуха. В третьем случае давление такое же, как и в первом, но увеличен расход.

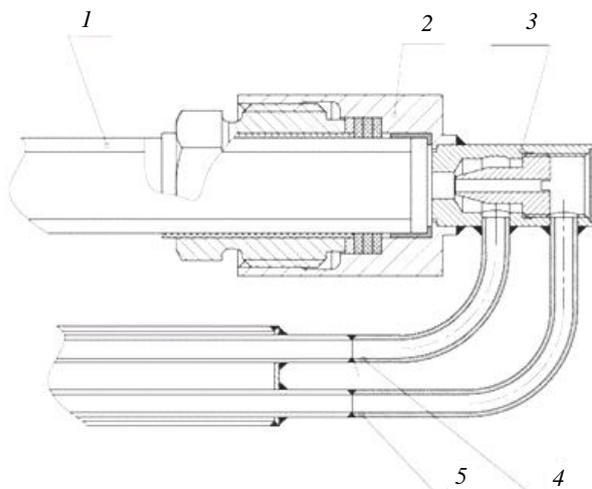


Рис. 1. Схема генератора газожидкостного спрея: 1 — рабочий участок; 2 — узел уплотнения; 3 — форсунка; 4 — линия подачи воздуха (газа); 5 — линия подачи воды

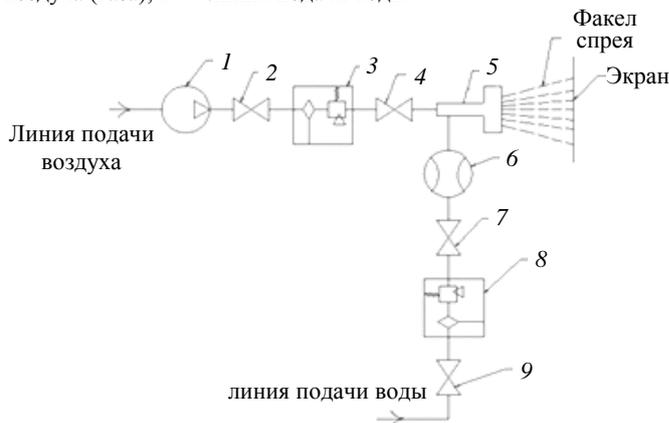


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для визуального изучения параметров факела распыла: 1 — компрессор; 2, 4, 7, 9 — вентили; 3, 8 — фильтр — регулятор давления; 5 — генератор газовойодяного спрея; 6 — расходомер

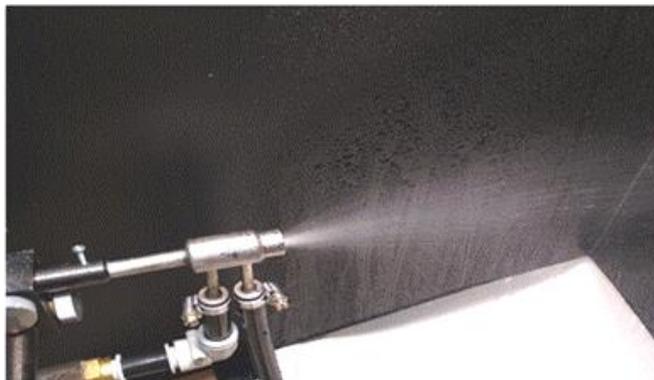


Рис. 3. Фотография диспергированного газожидкостного факела

Параметры трёх режимов спрея

Режим	Давление газа, 10^5 Па	Расход газа, г/с	Давление воды, 10^5 Па	Расход воды, г/с
1	2,0	30	6,0	4,3
2	3,5	30	6,0	4,3
3	2,0	75	6,0	8,2

На рис. 4 представлены распределения аксиальной скорости в плоскости лазерного ножа, показывающие, что струя далека от осесимметричной. На рис. 5 показаны профили аксиальной скорости в сечении факела распыла на расстоянии 70 мм от среза генератора спрея. На этом рисунке показано, что при большем давлении (режим 2) скорость растёт, а струя становится уже.

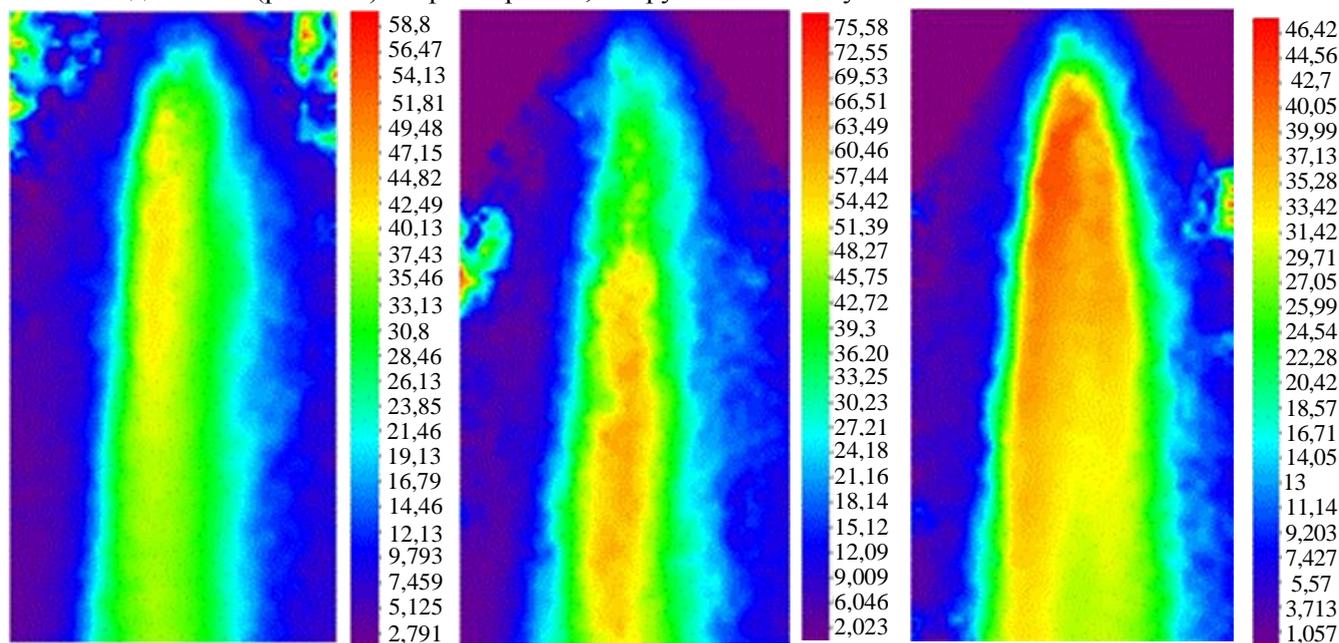


Рис. 4. Осевой компонент скорости в плоскости лазерного ножа для трёх режимов. Цветовая шкала даёт значения скорости в м/с

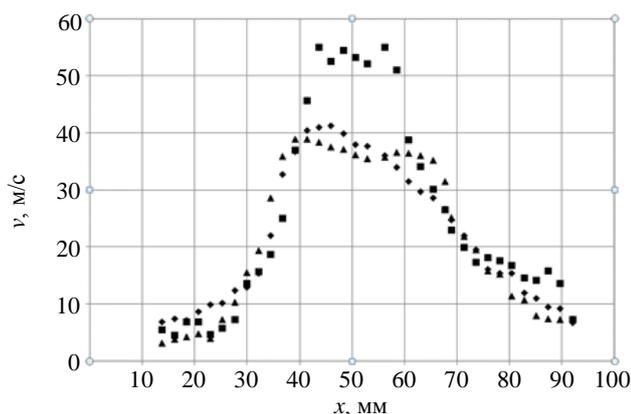


Рис. 5. Профиль аксиальной скорости на расстоянии 70 мм от среза сопла для трёх режимов: \diamond — режим № 1, \blacksquare — режим № 2, \blacktriangle — режим № 3

метод даёт большую погрешность, а во-вторых, масса жидкости, приходящаяся на эти мелкие капли, пренебрежимо мала (рис. 7). В режиме с повышенным расходом (режим 3) доля больших капель заметно

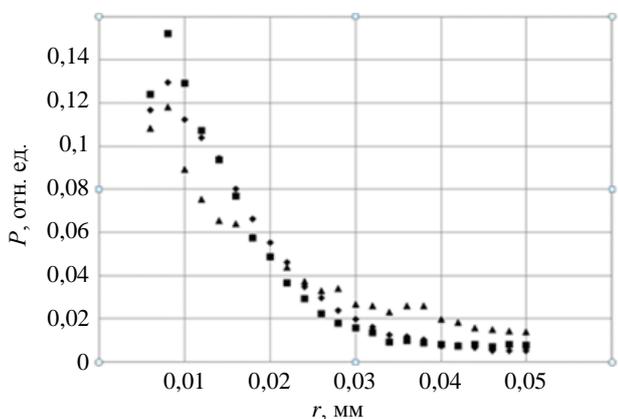


Рис. 6. Функция распределения капель по размеру (радиусу) в диапазоне $0,005 < r < 0,05$, мм для трёх режимов: \diamond — режим № 1, \blacksquare — режим № 2, \blacktriangle — режим № 3

Измерения размеров капель были выполнены методом IPI (Interferometric Particle Imaging), который основан на восстановлении размеров капель по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических прозрачных каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом света. Метод IPI эффективен при работе с частицами, радиус которых лежит в диапазоне от 5 до 100 мкм [12]. Нормализованные гистограммы (плотности распределения вероятности) для всех трёх режимов показаны на рис. 6.

При анализе гистограмм следует иметь в виду, что капли радиусом менее 5 мкм не показаны по двум причинам. Во-первых, на этих размерах метод даёт большую погрешность, а во-вторых, масса жидкости, приходящаяся на эти мелкие капли, пренебрежимо мала (рис. 7). В режиме с повышенным расходом (режим 3) доля больших капель заметно

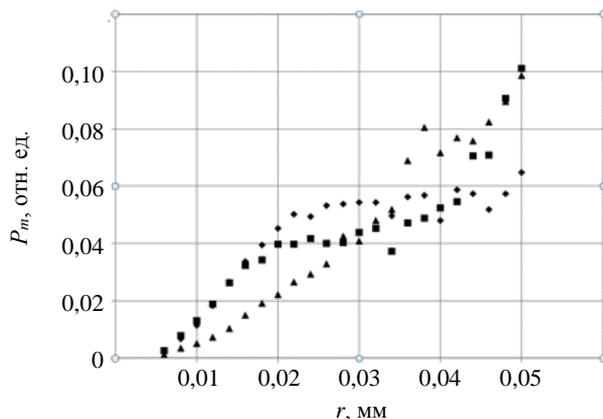


Рис. 7. Распределение массы воды по размеру капель для трёх режимов: \diamond — режим № 1, \blacksquare — режим № 2, \blacktriangle — режим № 3

растёт. На рис. 7 показано распределение массы жидкости по каплям определённого размера. В таком представлении становится ясно, какие капли нужно учитывать при оценках скорости парообразования и соответствующего потока тепла.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА МОДЕЛИ ЛИМИТЕРА

Рабочий участок — теплофизическая модель лимитера размещается в вакуумной камере. Источником энергии является электронно-лучевой агрегат ЭЛА-60/15Т. Стенд оборудован высокочастотной системой развёртки электронного луча по экспонируемой поверхности, что обеспечивает заданный, в том числе и равномерный, обогрев мишени. Более детальное описание экспериментального стенда приведено в [13, 14]. На рис. 8 представлена схема рабочего участка, состоящего из двух несущих трубок 2, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, и медной мишени 1, которая является приёмником энергии пучка электронов. Посадочные места 3 предназначены для установки рабочего участка в гидравлический контур посредством узлов герметизации. В мишени смонтированы четыре хромель-алюмелевые кабельные термопары $T_1—T_4$, позволяющие фиксировать температурное поле в стенке мишени. Координаты расположения термопар указаны на рисунке поперечного сечения мишени.

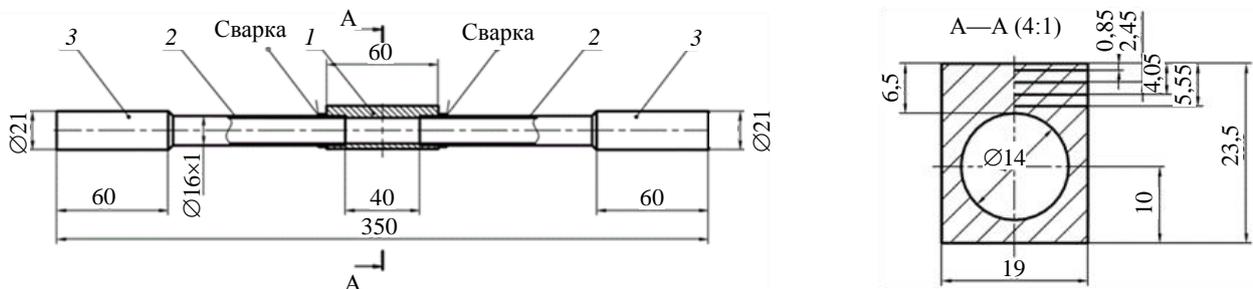


Рис. 8. Схема рабочего участка — теплофизической модели лимитера: 1 — мишень; 2 — несущие трубки; 3 — посадочные места

На рис. 9 представлена схема гидравлического контура, в котором установлены рабочий участок 1, генератор охлаждающего спрея 2. Для измерения расхода образовавшегося пара гидравлический контур содержит сепаратор 22, в котором разделяются паровая и жидкая фазы, конденсатор 21 и мерная ёмкость 19.

Типичное распределение температуры по ширине стенки мишени представлено на рис. 10. Как следует из этого рисунка, для исследованных режимов имеет место практически линейное распределение температуры, что позволяет, во-первых, определять плотность теплового потока, передаваемого через

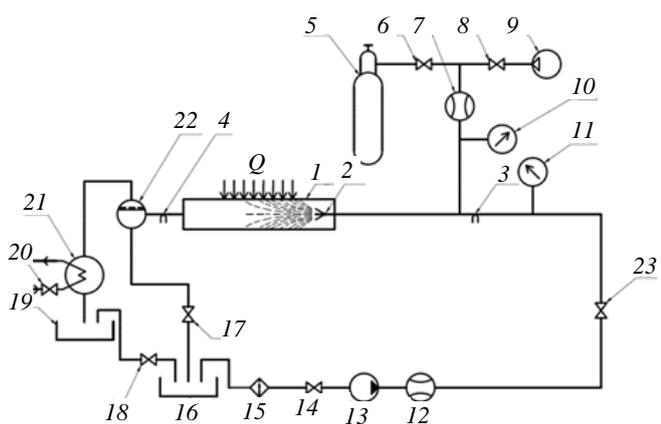


Рис. 9. Схема гидравлического контура для охлаждения рабочего участка: 1 — рабочий участок; 2 — форсунка (генератор газожидкого спрея); 3 — термопара на входе в РУ; 4 — термопара на выходе из РУ; 5 — баллон с рабочим газом; 6, 8, 14, 23 — вентиль регулирующий; 7, 18, 20 — вентиль запорный проходной; 7 — расходомер газового потока; 9 — компрессор; 10 — манометр давления газа на входе в форсунку; 11 — манометр давления воды на входе в РУ; 12 — расходомер водяного потока; 13 — насос водяной; 15 — фильтр грубой очистки; 16 — бак; 19 — мерная ёмкость; 21 — конденсатор; 22 — сепаратор

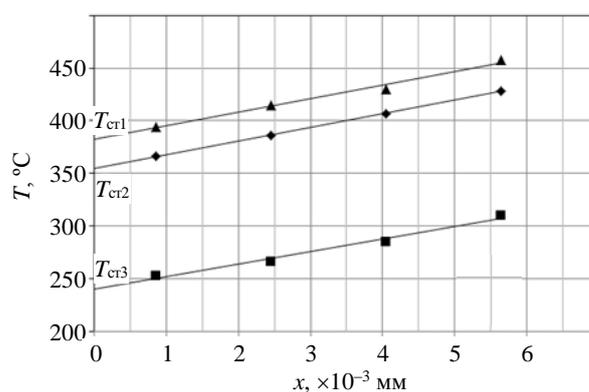


Рис. 10. Распределение температуры стенки по толщине рабочего участка в различных режимах охлаждения, $p_{\text{вода}} = 1,0 \cdot 10^5$ Па, $p_{\text{газ}} = 1,5 \cdot 10^5$ Па: $g = 0$ (▲), $g = 0,027$ (◆), $g = 0,037$ (■)

мишень, во-вторых, методом экстраполяции получить значение температуры внутренней поверхности стенки мишени, что, в свою очередь, позволяет рассчитать коэффициент теплоотдачи. На рисунке видно, что с ростом удельного расхода газа ($g = G_{\text{газ}}/G_{\text{вода}}$) в диспергированном газожидкостном факеле распыла (при неизменном расходе воды) температура мишени весьма заметно снижается. Здесь $G_{\text{газ}}$, $G_{\text{вода}}$ — массовый расход газа и дистиллированной воды.

На рис. 11 представлены экспериментальные данные о зависимости коэффициента теплоотдачи от удельного расхода газа в диспергированном газожидкостном факеле распыла при фиксированном расходе воды.

На рис. 12 показано изменение температуры стенки мишени (показания термодпары T_1) при увеличении массового расхода газа, прокачиваемого через рабочий участок. В результате использования газовой смеси, прокачиваемой по внутренней трубе при неизменной плотности теплового потока, температура стенки мишени изменяется более чем на 200 °С. На этом рисунке наглядно видна эффективность метода теплосъёма с высокой плотностью энергии диспергированным потоком теплоносителя.

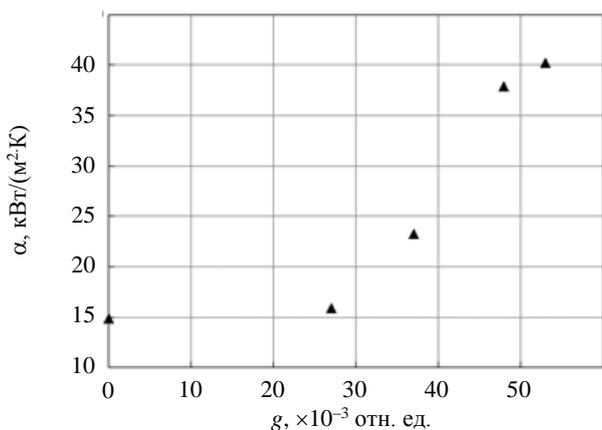


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного расхода газа диспергированного факела распыла, $p_{\text{вода}} = 1,0 \cdot 10^5$ Па, $p_{\text{газ}} = 1,5 \cdot 10^5$ Па

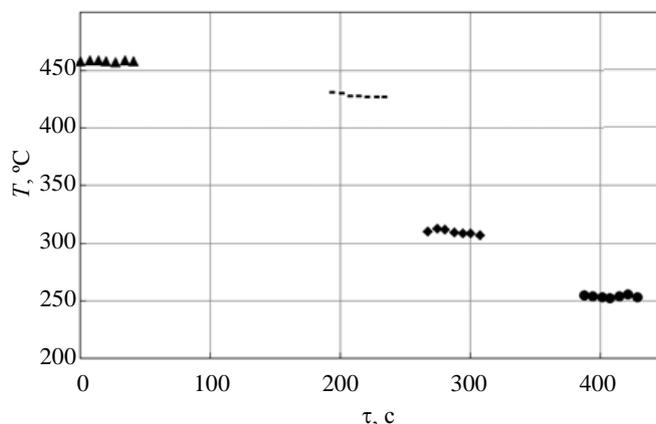


Рис. 12. Динамика изменения температуры мишени по мере роста удельного расхода газа в спрее, $p_{\text{вода}} = 1,0 \cdot 10^5$ Па, $p_{\text{газ}} = 1,5 \cdot 10^5$ Па: $g = 0$ (\blacktriangle), $0,027$ (---), $0,037$ (\blacklozenge), $0,047$ (\bullet)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследован инновационный способ температурной стабилизации модели внутрикамерного элемента токамака (аналог лимитера токамака Т-10), для чего:

— выполнены исследования параметров факела газожидкостного распыла, создаваемого разработанным авторами генератором спрея;

— разработан и изготовлен гидравлический контур для проведения экспериментальных исследований на модели лимитера. Для выполненных исследований использовался экспериментальный стенд с электронным нагревом поверхности мишени, параметры стенда приведены в [13, 14].

Результаты выполненных исследований показали, что данная конструкция генератора спрея способна обеспечить значительное понижение температуры стенки реальных лимитеров (при $q = 4,9$ МВт/м², $T = 200$ —300 °С), что позволяет использовать предложенный авторами способ охлаждения на высоконагруженных элементах термоядерных реакторов.

Температура стенки мишени при охлаждении её диспергированным газожидкостным потоком заметно падает, а теплоотдача возрастает в разы по сравнению с охлаждением струёй однофазной жидкости при тех же параметрах. В режимах с малым удельным расходом газа температура внутренней поверхности рабочего участка превышает температуру предельного перегрева, которая в условиях эксперимента равна $T_{\text{п}} = 306,6$ °С [14]. Механизм теплообмена, стабильность режимов теплосъёма при столь высоких температурах требуют дополнительного и тщательного изучения. Тем самым продемонстрированы эффективность и перспективность предложенного способа температурной стабилизации внутрикамерных элементов токамака, обладающего существенными преимуществами по сравнению с ранее использовавшимися (водяной теплоноситель под давлением, жидкометаллический теплоноситель).

Для применения полученных первых результатов по эффективности теплосъёма и термостабилизации лимитера диспергированным потоком и использованию этого метода охлаждения в современных термоядерных реакторах необходимо продолжить детальные исследования, в том числе при больших значениях плотности теплового потока (до 15 МВт/м²), давления воздуха (до 4,0·10⁵ Па), в этом направлении. Также необходимо провести систематизированные исследования по изучению влияния геометрических параметров форсунки с целью возможного усовершенствования её конструкции.

Статья подготовлена по материалам конференции ISLA-2017. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 16-19-10457).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lyublinski I., Vertkov A., Mirnov S., Lazarev V. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 1156—1159; doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.12.017.
2. Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T., Kostina A.N., Lazarev V.B., Nesterenko V.M., Vertkov A.V. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 224—228.
3. Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T., Dzhurik A.S., Kravchuk S.I., Lazarev V.B., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Shcherbak A.N. — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, p. 123015; doi: 10.1088/0029-5515/55/12/123015.
4. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Y., Mirnov S.V., Vershkov V.A., Glazyuk Y.V., Notkin G.E., Grashin S.A., Kislov A.Y., Komov A.T. — Nuclear Fusion, 2017, vol. 57, p. 066006; doi: 10.1088/1741-4326/aa65e9.
5. Pistunovich V.I., Vertkov A.V., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Korjavin V.M., Petrov V.B., Khripunov B.I., Shapkin V.V. — J. Nucl. Mater., 1996, vol. 233—237, p. 650—654.
6. Еvtikhin B.A., Люблинский И.Е., Пистуневич В.И., Вертков А.В., Коржавин В.М., Петров В.Б., Хрипунов Б.И., Шапкин В.В. — Перспективные материалы, 1997, т. 2, с. 49—54.
7. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Khripunov B.I., Petrov V.B., Shapkin V.V., Romanov P.V. — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 201—205.
8. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Semenov V.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Tazhibayeva I.L., Shapovalov G.V., Kulsartov T.V., D'yachenko A.V., Mazzitelli G., Agostini P. — Fusion Eng. and Design, 2013, vol. 88, p. 1862—1865.
9. Бобков В.П. и др. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 1. Свойства жидкометаллических теплоносителей. Под общей редакцией В.М. Поплавского. — М.: ИздАт, 2011.
10. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Ezhov N.I., Shcherbakov V.M. — Fusion Eng. and Design, 2005, vol. 75—79, p. 1071—1074.
11. Bilsky A.V., Lozhkin Y.A., Markovich D.M. — Thermophysics and Aeromechanics, 2011, vol. 18, p. 1—12.
12. Sukhanovskii A., Batalov V., Stepanov R. — In: AIP Conference Proceedings, 2016, vol. 1770, p. 030023; doi:http://dx.doi.org/10.1063/1.4963965.
13. Гусаров А.В., Касаткин А.П., Комов А.Т. — В сб.: Инженерные и физические проблемы термоядерной энергетики. Труды Моск. энерг. ин-та, 1993, вып. 659, с. 24—28.
14. Касаткин А.П., Комов А.Т., Наумов В.К. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1993, вып. 1—2, с. 60—65.
15. Скрипов В.П., Синицин Е.Н., Павлов П.А. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. — М.: Атомиздат, 1980.



Алексей Викторович Вертков, заместитель начальника отдела, к. техн. н.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1А, Россия
avertkov@yandex.ru



Александр Тимофеевич Комов д. техн. н., профессор, советник при ректорате, награждён медалями «За трудовое отличие» и «В память 850-летия Москвы»; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 17, Россия
komovat@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



Сергей Владимирович Мирнов, начальник отдела, профессор, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат Государственной премии СССР и премии им. Л.А. Арцимовича РАН, член Международного комитета по координации физических исследований в поддержку проекта ИТЭР, эксперт МАГАТЭ по токамакам; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия



Александр Николаевич Варава, доцент, к. техн. н., профессор, награждён медалью «В память 850-летия Москвы»; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 17, Россия



Алексей Викторович Дедов, заведующий кафедрой, директор института, д. техн. н., доцент, член-корреспондент РАН; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 17, Россия



Александр Валентинович Захаренков, доцент, к. техн. н.; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 17, Россия
ZakharenkovAV@mpei.ru,



Петр Готлобович Фрик, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н., профессор, награждён премией имени академика Петрова Г.И.; Институт механики сплошных сред УрО РАН, 613001 Пермь, ул. Академика Королева 1, Россия; заведующий лабораторией; Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 111250 Москва, ул. Красноказарменная 17, Россия

Статья поступила в редакцию 12 января 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 51—58.