

УДК 621.039.634

НОВЫЙ ВАРИАНТ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА КТМ*А.В. Вертков¹, М.Ю. Жарков¹, И.Е. Люблинский^{1,2}, А.В. Берлов¹, И.Л. Тажибайева^{2,3}, Ю.В. Понкратов³,
Ю.Н. Гордиенко³*¹АО «Красная Звезда», Москва, Россия²Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия³Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Республика Казахстан

В настоящее время в стадии реализации находится проект казахстанского материаловедческого токамака КТМ. Кроме решения задач по исследованию материалов для термоядерных технологий, на токамаке ведётся отработка инновационных конструкций элементов дивертора. Была разработана и успешно испытана в условиях реального токамака конструкция модуля литиевого дивертора на основе литиевых капиллярно-пористых систем. В этой конструкции решение проблемы отвода тепловых потоков высокой плотности было реализовано за счёт применения жидкометаллического теплоносителя на основе эвтектического сплава Na—K. Требования по повышению безопасности и совместимости конструкции дивертора с другими внутрикамерными элементами токамака, охлаждаемыми водой, и ограничению температуры литиевой приёмной поверхности на уровне <600 °С при тепловых потоках 10—20 МВт/м² привели к новому конструктивному решению для экспериментального модуля дивертора и использованию принципиально нового теплоносителя — диспергированного газом водяного потока (газоводяного спрея). В статье рассмотрены и обосновываются конструкторские решения новой версии модуля, приведены параметры теплоносителя и схема системы охлаждения. Рассмотрены экспериментальные результаты по определению коэффициента теплоотдачи для теплоносителя на основе газоводяного спрея.

Ключевые слова: литий, токамак, дивертор, жидкометаллический теплоноситель, газоводяное охлаждение.

NEW VERSION OF LITHIUM DIVERTOR OF KTM TOKAMAK*A. V. Vertkov¹, M. Yu. Zharkov¹, I. E. Lyublinski^{1,2}, A. V. Berlov¹, I. L. Tazhibayeva^{2,3}, Yu. V. Ponkratov³,
Yu. N. Gordienko³*¹JSC «Red Star», Moscow, Russia²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia³Institute of Atomic Energy NNC of RK, Kurchatov, Kazakhstan

At present the project of Kazakhstan materials science tokamak KTM is under implementation. In addition to solving problems in the study of materials for fusion technologies, innovative design elements of the divertor are optimized. The design of the lithium divertor module based on lithium capillary-porous systems has been developed and successfully tested under real tokamak conditions. In this design, heat flows of high density are removed by the eutectic Na—K alloy. Requirements to improve the safety and compatibility of the divertor design with other in-vessel elements of the tokamak, cooled by water, and limiting the temperature of the lithium receiving surface at <600 °C at heat flows of 10—20 MW/m² led to the new design solution for the experimental module of the divertor and the use of a new coolant — gas dispersed water flow (gas-water spray). The article describes and justifies the design solutions of the new version of the module, the parameters of the coolant and the cooling system scheme. Experimental results on determination of heat transfer coefficient for coolant based on gas-water spray are considered.

Key words: lithium, tokamak, divertor, liquid metal coolant, gas-water cooling.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-5-13

ВВЕДЕНИЕ

Токамак КТМ (казахстанский токамак материаловедческий) является совместным проектом казахстанских и российских учёных и имеет статус первого в мире технологического токамака для реакторного материаловедения в УТС. Это сферический токамак с аспектным отношением, равным 2, однонулевой диверторной конфигурацией плазмы, максимальным током плазмы 750 кА, тороидальным магнитным полем 1 Тл и длительностью разряда до 5 с, которая реализуется путём применения системы дополнительного ВЧ-нагрева плазмы (ионно-циклотронный разогрев), вводимой в плазму мощностью 5—7 МВт. Мощность тепловой нагрузки на приёмные диверторные пластины может достичь 10—20 МВт/м², что сравнимо с ожидаемыми нагрузками в диверторной области строящегося термоядерного реактора ИТЭР. Основные физические параметры токамака КТМ приведены в работах [1—4].

Основная задача КТМ — проведение исследований взаимодействия материалов с высокотемпературной плазмой, испытания материалов ответственных узлов будущих термоядерных реакторов (ТЯР), источников термоядерных нейтронов (ТИН) и гибридных реакторов синтеза-деления.

Основное качественное отличие токамака КТМ от аналогичных установок — наличие транспортно-шлюзового и приёмно-диверторного устройств. Это позволяет заменять исследуемые образцы в кратчайшие сроки, без разгерметизации вакуумной камеры, что во много раз увеличивает скорость получения и объём экспериментальных данных.

В высоковакуумной камере должен создаваться плазменный шнур вытянутой конфигурации, основной тепловой поток из которого направляется в диверторную область на приёмные пластины. Вытянутость сечения плазмы $k_{95} = 1,7$ и камеры $k_{ВК} = 2,7$ определялась возможностью создания ИТЭР-подобной однонулевой диверторной конфигурации ($k_C = 1,9$) в нижней части плазменного шнура и необходимостью иметь диверторный объём, достаточный для размещения диверторного устройства со сменными диверторными пластинами. Исследования и испытания диверторных пластин различных материалов и конструкций являются основными задачами работы установки. Внешний вид токамака КТМ представлен на рис. 1.

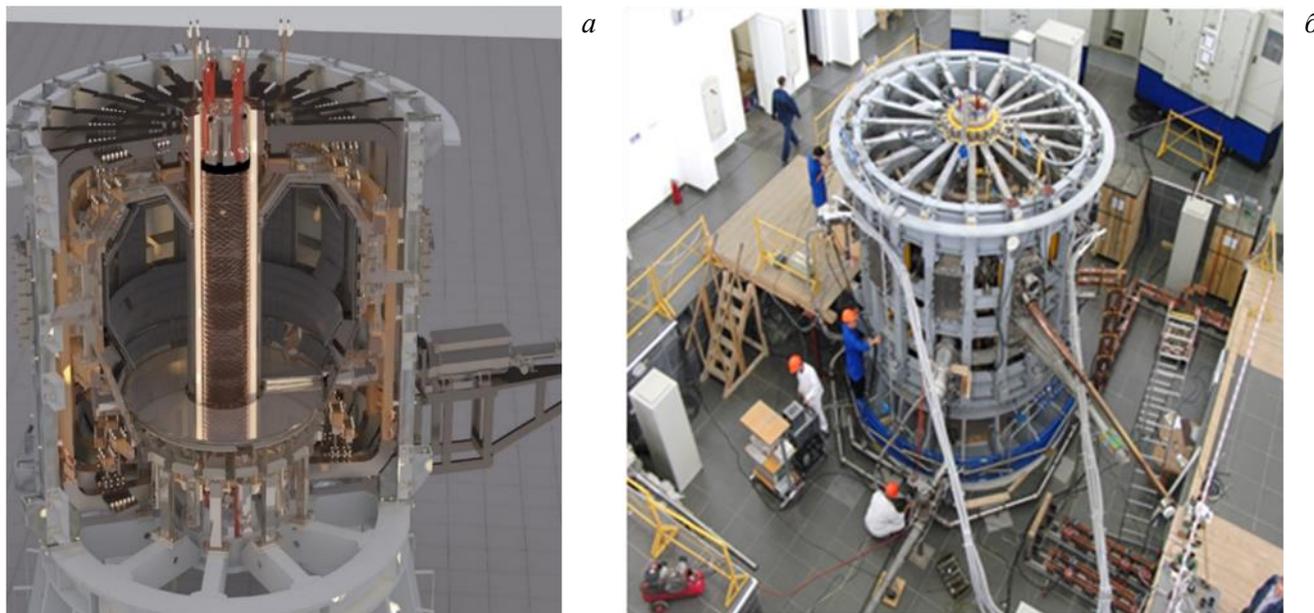


Рис. 1. Токамак КТМ: а — 3D-модель; б — внешний вид

В июне 2017 г. на токамаке КТМ совместной российско-казахстанской командой специалистов была проведена первая очередь физического пуска установки. В настоящее время на экспериментальном комплексе КТМ проводятся следующие работы: отладка системы управления и контроля плазмы, отработка сценариев горения плазмы при омическом нагреве, сборка системы дополнительного ВЧ-нагрева плазмы, отладка штатной системы и модернизация системы предионизации плазмы, отладка и модернизация системы электропитания токамака КТМ. Параллельно проводятся работы по подготовке технологических и диагностических систем, а также экспериментального комплекса в целом к следующему этапу физического пуска, который должен быть осуществлён совместно с российскими специалистами до конца 2019 г.

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ДИВЕРТОР НА ОСНОВЕ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Использование жидких металлов и, в первую очередь, лития рассматривается как перспективный альтернативный вариант защиты элементов первой стенки и дивертора токамака. Литиевые внутрикамерные элементы способны к саморегенерации и могут обеспечить в отличие от твёрдых материалов (вольфрам и др.) длительную стационарную работу токамака.

Литиевый модуль диверторной пластины токамака КТМ был создан на основе литиевой капиллярно-пористой системы (КПС) с матрицей из нержавеющей стали. В особо энергонапряжённой зоне диверторной пластины был использован пористый вольфрам. Материал основы КПС должен иметь хорошую совместимость с жидким литием (высокую коррозионную стойкость, нечувствительность к охрупчиванию жидким металлом), низкую чувствительность механических свойств к радиационным повреждениям, хорошую смачиваемость жидким металлом, хорошую теплопроводность, высокие объёмные и поверхностные коэффициенты пористости, минимальный размер структурных элементов основы КПС.

В этом смысле материалы на основе металлического волокна из Мо или W, такие как сетка или войлок, являются наиболее предпочтительными.

При рассмотрении возможности использования литиевой КПС в качестве материала защиты внутренних элементов токамака, в частности, диверторных пластин было принято во внимание следующее. Увеличение срока службы материалов, обращённых к плазме, требует снижения действующих удельных тепловых нагрузок путём перераспределения теплового потока на большую площадь посредством механизма испарения-конденсации и переизлучения. Первый метод при использовании лития обеспечивает отвод тепловых потоков в сотни МВт/м², так как литий обладает высокой скрытой теплотой испарения. Вторым механизмом снижения локальных тепловых нагрузок является переизлучение на атомах лития в приповерхностном слое. При использовании литиевых КПС защитная мишень образуется естественным путём и контролируется регулированием рабочей температуры поверхности, контактирующей с плазмой. В итоге вытекающий из плазмы тепловой поток будет перераспределяться на большую площадь путём излучения и локальная тепловая нагрузка на поверхность материалов будет уменьшаться. Отвод энергии от внутрикамерного элемента будет осуществляться теплопроводностью к системе охлаждения, где теплообмен с теплоносителем будет протекать в мягком режиме. Важным является и то, что плавление материала основы КПС не может быть достигнуто в принципе пока КПС заполнена литием. Накопление трития в литиевой КПС возможно регулировать путём медленной циркуляции лития (смены лития в КПС) при поддержании концентрации в нём трития на требуемом уровне с помощью систем извлечения.

Ранее на экспериментальном комплексе были созданы и испытаны охлаждаемый с помощью эвтектического сплава Na—К и неохлаждаемый модули литиевого дивертора (МЛД) на основе литиевой КПС. Жидкометаллический теплоноситель для снятия избыточной тепловой энергии, приходящей из плазмы, был выбран по следующим основным соображениям: низкая температура затвердевания ($-12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) и, как следствие, простота эксплуатации теплообменной системы; высокие теплофизические характеристики; низкое давление в теплообменной системе. Один из 24 секторов диверторного стола вакуумной камеры КТМ был заменён на модуль литиевого дивертора. Схема размещения модуля литиевого дивертора с системой термостабилизации на токамаке КТМ показана на рис. 2. Модуль литиевого дивертора, охлаждаемого эвтектикой Na—К, прошёл успешный цикл испытаний, подтвердивших его расчётные теплофизические характеристики [7].

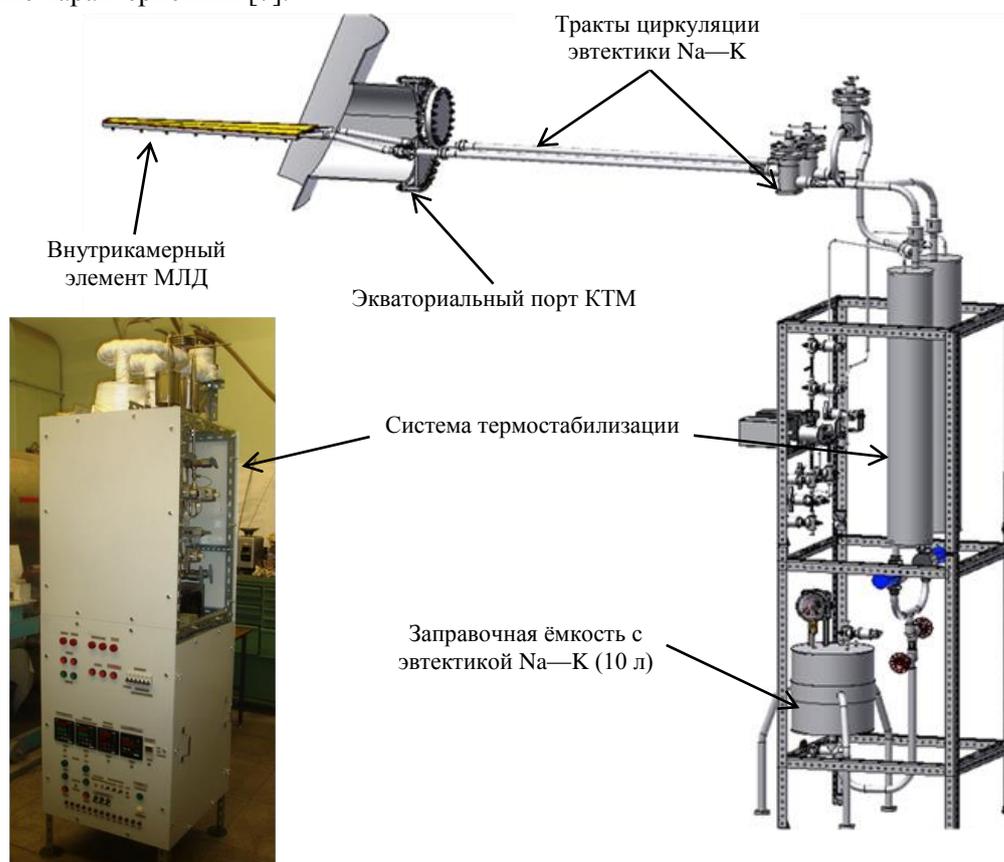


Рис. 2. Фото (а) и схема (б) размещения модуля литиевого дивертора с системой термостабилизации на токамаке КТМ

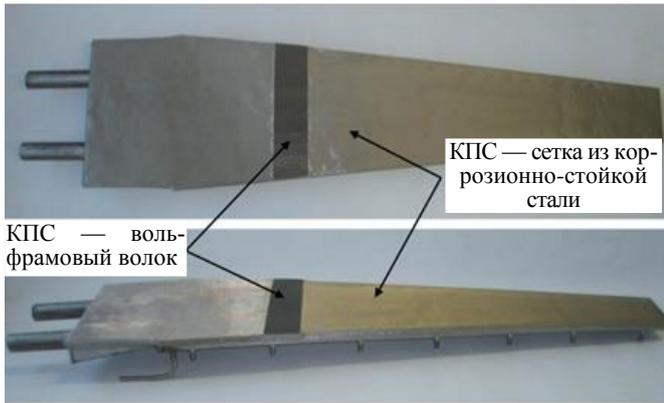


Рис. 3. Внешний вид МЛД (внутрикамерный элемент)

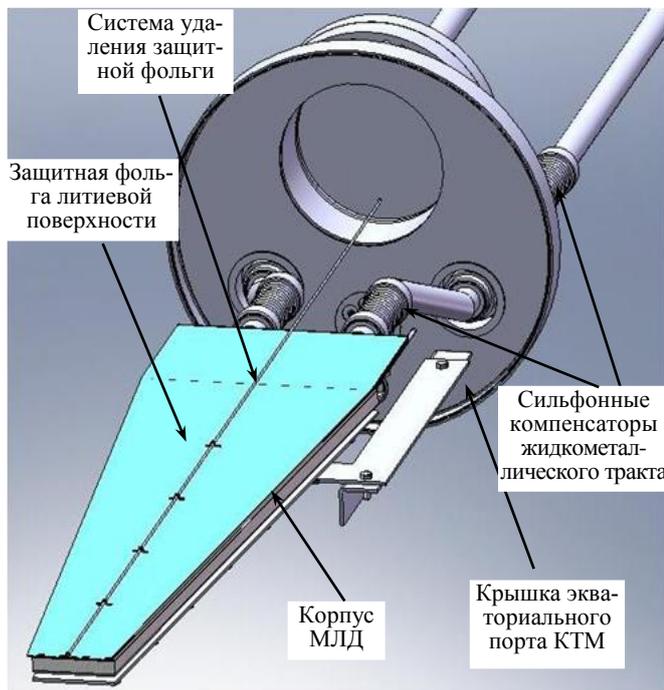


Рис. 4. Основные компоновочные элементы МЛД

На рис. 3 показан внешний вид МЛД. На рис. 4 показаны основные компоновочные элементы МЛД. На рис. 5 МЛД показан до (а) и после (б) проведённых на токамаке КТМ испытаний. Основные результаты испытаний были опубликованы в работах [5—7].

Эксперименты на токамаках Т-11М, Т-10, FTU показали [8], что литиевые КПС способны выдерживать высокие квазистационарные нагрузки и за счёт капиллярных сил самообновлять поверхность, контактирующую с плазмой. В то же время применение эвтектического сплава Na—К для поддержания необходимого температурного режима является небезопасным, так как это химически агрессивный металл, который может воспламениться в случае контакта с воздухом и реагирует со взрывом при контакте с водой. Кроме этого момента, у эвтектики Na—К, как и у других жидкометаллических теплоносителей, существует серьёзное ограничение, препятствующее их использованию в термоядерных системах с магнитным удержанием плазмы — это МГД-сопротивление потоку жидкого металла в поперечном магнитном поле [9]. Это свойство жидкометаллического теплоносителя 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 литиевого дивертора на основе литиевых КПС.

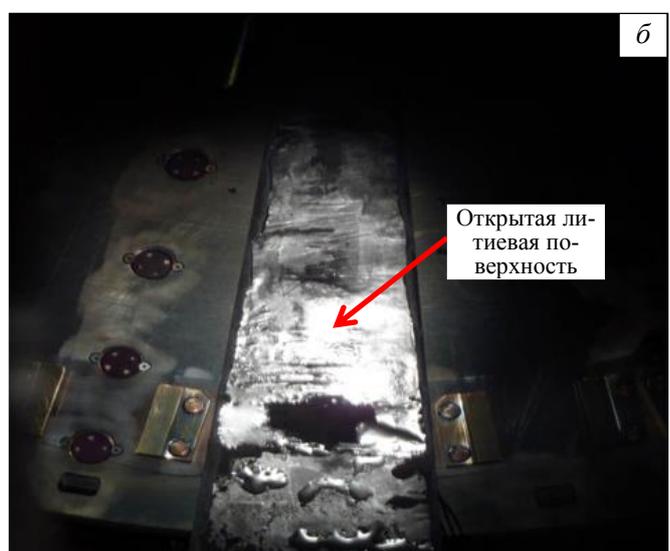
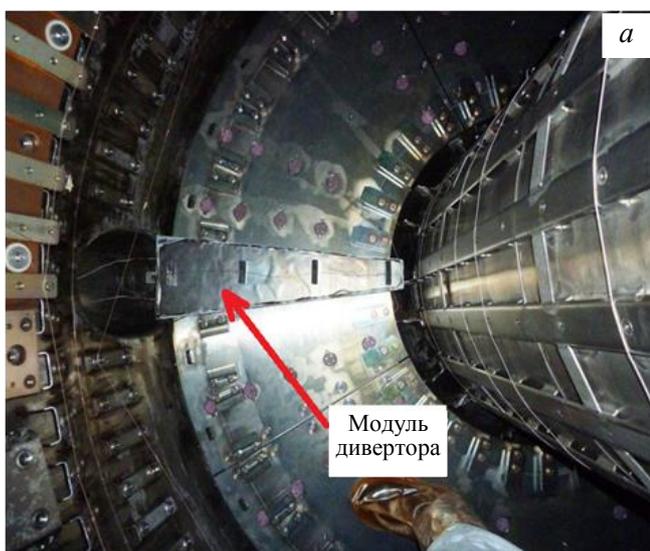


Рис. 5. Модуль литиевого дивертора в вакуумной камере КТМ до (а) и после (б) испытания

НОВЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ ДЛЯ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА КТМ — ГАЗОВОДЯНОЙ ДИСПЕРГИРОВАННЫЙ ПОТОК

Отвод тепловых потоков удельной плотностью 10—20 МВт/м², которые ожидаются на приёмных поверхностях внутрикамерных элементов (ВКЭ) токамаков масштаба ИТЭР и ДЕМО, является критической проблемой. Кроме того, для ВКЭ на основе жидкого лития принципиально важным является также условие ограничения температуры приёмной поверхности на уровне не выше 700 °С, что при условии активного переосаждения испарённого лития позволит контролировать на приемлемом уровне его поток в плазму токамака [10]. Проведённый анализ возможности использования традиционных для термоядерных реакторов теплоносителей (газообразный гелий, вода, жидкие металлы) показал, что конвективный механизм теплоотвода, характерный для однофазных теплоносителей, не позволяет отвести столь мощные тепловые потоки при допустимых параметрах давления и расхода (см. таблицу).

Параметры теплоносителей

Теплоноситель	Давление, МПа	Скорость потока, м/с	Температура, °С	Коэффициент теплоотдачи, кВт/(м ² ·К)
Жидкий литий	0,01	1	200	44
Вода	5	10	200	25—50
Газ (гелий)	15	135	200	20
Спрей газ—вода	0,2	20	20	70—80

Для жидких однофазных теплоносителей при ожидаемых тепловых потоках до 20 МВт/м² можно рассматривать лишь жидкие металлы (литий, натрий, эвтектика Na—K). Однако для жидкометаллических теплоносителей, как уже отмечалось, серьёзными проблемами являются высокое сопротивление прокачки в системе охлаждения вследствие возникающих сил магнитогидродинамической природы и активное взаимодействие с водой и воздухом. В качестве нового подхода к решению вопроса эффективного теплоотвода от энергонагруженных элементов предложено использовать мелкодисперсный газовойодяной диспергированный поток (водяной спрей в потоке газа) [11]. Основным преимуществом такого теплоносителя является высокая эффективность теплоотвода за счёт теплоты фазового перехода вода—пар в мелкодисперсной жидкой фазе. Скрытая теплота испарения воды составляет 2,4 МДж/кг. Газовая фаза обеспечивает подвод капель жидкости к охлаждаемой поверхности и отвод пара. Кроме того, такому теплоносителю не присуще возникновение кризисных явлений при теплоотдаче. Сопоставляя рабочие параметры и коэффициенты теплоотдачи, приведённые в таблице, можно заключить, что газовойодяной спрей имеет большие преимущества по коэффициенту теплоотдачи. Для отведения тепловых потоков до 20 МВт/м² удельный расход жидкой фракции не будет превышать 10 кг/(м²·с), т.е. для реактора типа ДЕМО при площади дивертора около 65 м² полный расход жидкой фракции составит ~650 кг/с. При таких параметрах с точки зрения последствий утечки теплоносителя для вакуумной камеры реактора и совместимости с литием на приёмной поверхности ВКЭ он менее опасен по сравнению с традиционным водяным теплоносителем.

Детальное исследование [12—14] работы системы охлаждения с теплоносителем на основе газовойодяного спрея изучено в условиях лабораторной установки на модельных образцах ВКЭ, изготовленных из меди [13]. При исследовании имелась возможность регулировки параметров теплоносителя — давления, расхода, соотношения газовой и жидкой фаз. Тепловая нагрузка на поверхность образца задавалась сканирующим электронным лучом. Плотность теплового потока регулировалась в интервале 0—12 МВт/м². Как было установлено, эффективность охлаждения возрастала с увеличением дисперсности жидкой фазы (рис. 6), которая росла с ростом удельного расхода газа, подаваемого в форсунку, при посто-

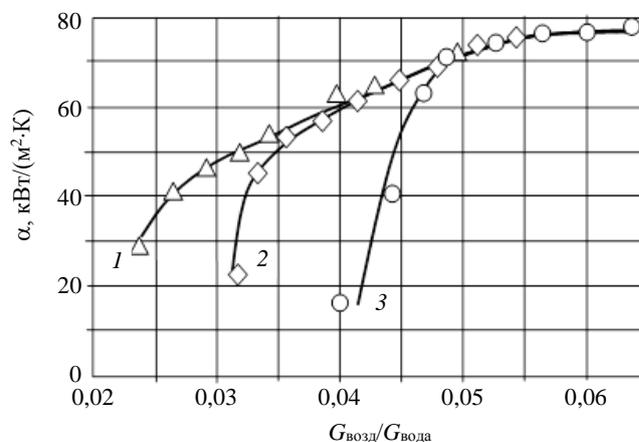


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от отношения массового расхода газа и воды при расходе воды 0,033 (1), 0,042 (2), 0,050 кг/с (3)

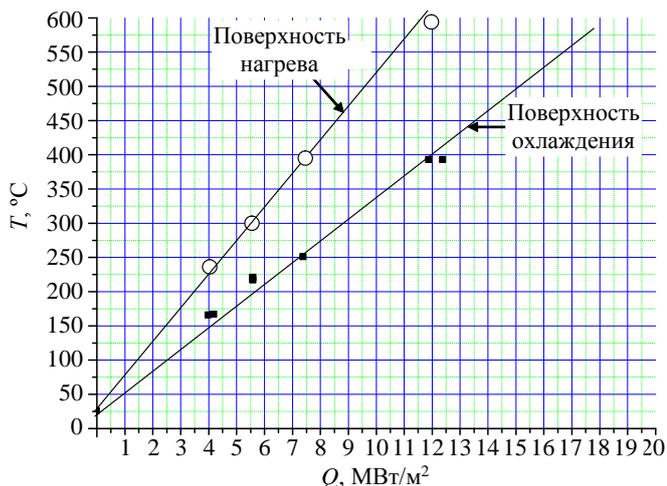


Рис. 7. Зависимость температуры внешней и внутренней поверхности канала охлаждения от величины теплового потока при коэффициенте теплоотдачи 70 кВт/(м²·К)

янном расходе воды. С ростом расхода жидкой фазы при оптимальной дисперсности жидкости в факеле распыла (диаметр каплей ~50 микрон) удалось достичь величины коэффициента теплоотдачи на уровне 70—80 кВт/(м²·К). Эта величина значительно превышает значения для традиционных теплоносителей (см. таблицу). Зависимость температуры внешней и внутренней поверхности канала охлаждения от величины теплового потока при коэффициенте теплоотдачи 70 кВт/(м²·К) представлена на рис. 7. Таким образом было показано, что впервые реализованная для ВКЭ система отвода тепла на основе двухфазного теплоносителя газ—вода имеет ряд существенных преимуществ: низкое давление теплоносителя, высокий коэффициент теплоотдачи, высокая управляемость работой системы и низкая инерционность, отсутствие кризисных явлений теплоотдачи при высокой температуре охлаждаемой стенки.

Предлагаемый теплоноситель на практике был впервые использован в конструкции охлаждаемого жидкометаллического лимитера токамака FTU, основанного на использовании КПС, заполненной оловом [11]. Вид и схема конструкции этого лимитера представлены на рис. 8, 9.

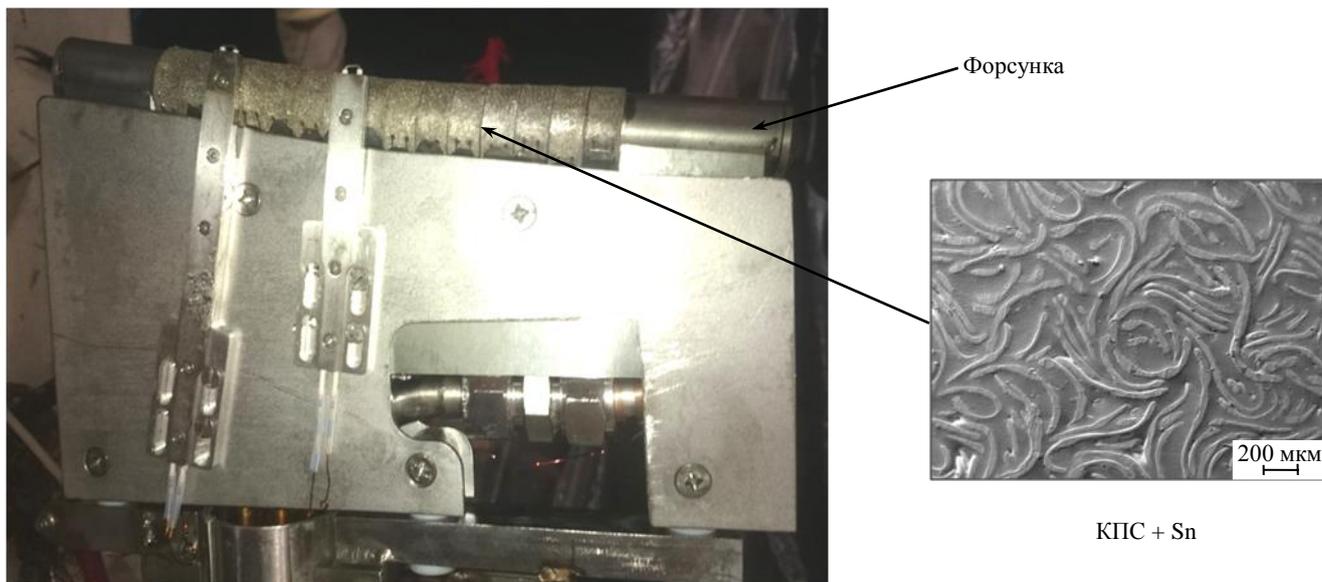


Рис. 8. Внешний вид жидкометаллического лимитера токамака FTU

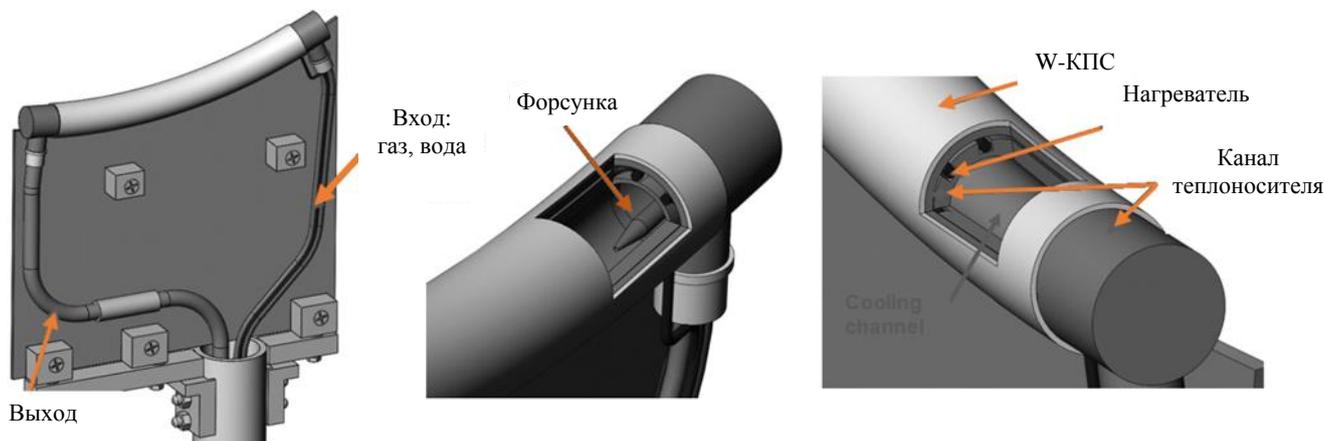


Рис. 9. Схема жидкометаллического лимитера токамака FTU

Учитывая преимущества рассматриваемого теплоносителя, предлагается его использовать при создании стационарных литиевых ВКЭ (дивертор, лимитер) токамаков Т-11М, Т-15МД, жидкометаллической диверторной мишени токамака ДЕМО [15] и в качестве нового варианта диверторной мишени токамака КТМ.

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ЛИТИЕВОГО ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА КТМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОВОДОЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для реализации возможности использовать теплоноситель на основе газовой смеси разработана новая конструкция модуля литиевого дивертора токамака КТМ. МЛД токамака КТМ представляет собой коробчатую конструкцию с установленной капиллярно-пористой структурой на её верхней части и крепится посредством кронштейна на фланце экваториального патрубка токамака (рис. 10).

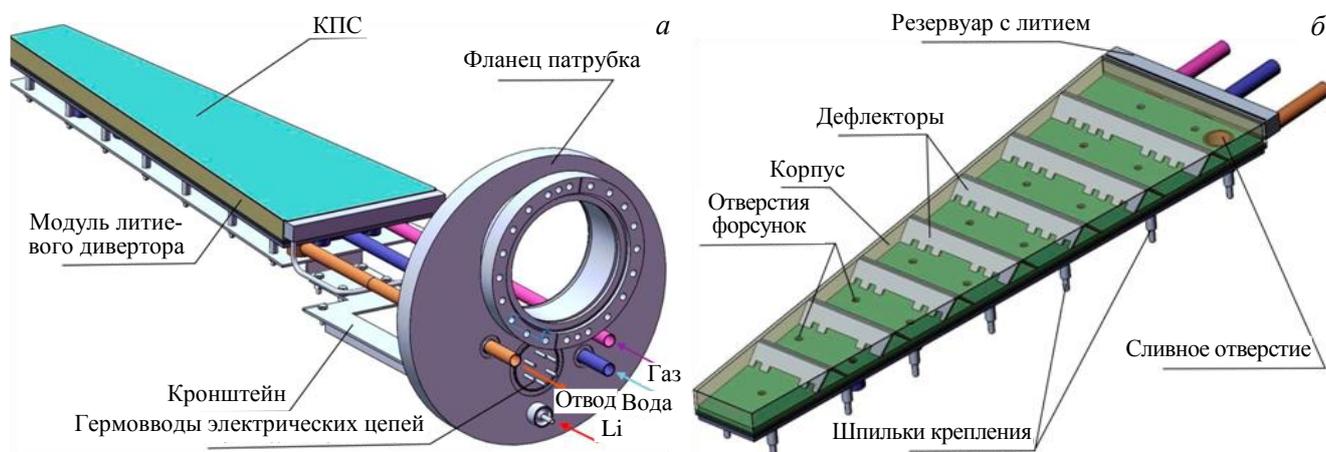


Рис. 10. Модуль литиевого дивертора токамака КТМ: *a* — модуль литиевого дивертора, сопряжённый с крышкой экваториального порта; *б* — конструкция модуля литиевого дивертора

Каналом хладагента являются дефлекторы, установленные во внутренней полости корпуса. Смешение воды и газа происходит в форсунках, представляющих собой жиклёры с приваренными к ним трубопроводами подвода воды и установленных в специальных пазах подачи газа на нижней стенке корпуса модуля. Жиклёры приварены к пластине, крепящейся к корпусу, и составляют с ней единый форсуночный узел (рис. 11).

Отвод хладагента осуществляется через сливное отверстие и отводной трубопровод. Для восполнения потерь лития при работе устройства предусмотрен резервуар, в котором КПС имеет гидравлический контакт с запасом лития. При необходимости есть возможность пополнения запасов лития через специальную линию заправки. МЛД крепится к кассете с помощью шпилек, установленных на нижней части модуля. Внешние системы МЛД представляют собой регулируемые источники дистиллированной воды и газа (воздух, аргон, гелий). Отводящаяся парогазовая смесь поступает в конденсатор и охлаждается в теплообменнике вода—вода. На следующих этапах работы предполагается спроектировать и изготовить МЛД на основе КПС с системой термостабилизации парогазовой смеси низкого давления и провести его стендовые испытания для оценки эффективности системы охлаждения.

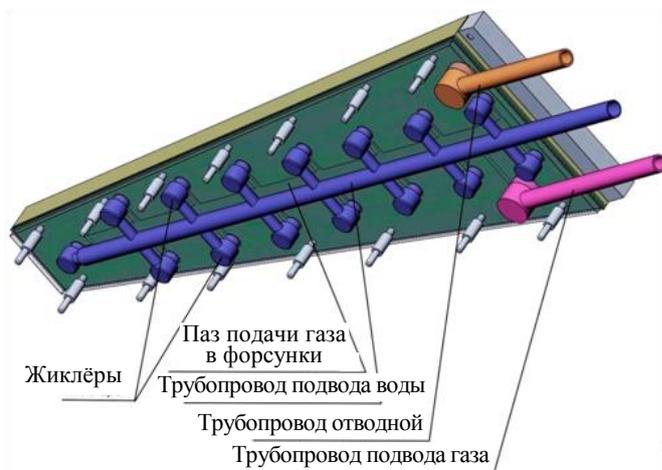


Рис. 11. Форсуночный узел модуля литиевого дивертора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критический анализ конструкции модуля литиевого дивертора токамака КТМ показал, что в условиях аварийной ситуации разработанный ранее вариант его охлаждения эвтектическим сплавом Na—К обладает серьёзными недостатками. Поскольку существует потенциальная возможность развития ситуации с утечкой теплоносителя в вакуумной камере (1) или вне её (2), то потребуются либо применение заведомо сложной и не отработанной процедуры удаления жидкого металла из вакуумной камеры токамака, либо может произойти возгорание теплоносителя при его взаимодействии с воздухом. Кроме того, высокое сопротивление прокачки в системе охлаждения вследствие возникающих сил магнитогидродинамической природы существенно осложнит её функционирование даже при относительно низких (~1 м/с) скоростях прокачки жидкого металла.

Использование в качестве теплоносителя для охлаждения модуля литиевого дивертора мелкодисперсного газовойдяного диспергированного потока, обладающего, как показали экспериментальные исследования, высокими теплофизическими характеристиками, позволит снизить давление в трактах охлаждения и иметь низкое объёмное содержание воды в трактах охлаждения литиевого модуля. Эти свойства теплоносителя позволят упростить конструкцию модуля дивертора и сделать работу с ним безопасной. Для предложенного теплоносителя принципиально отсутствует проблема МГД-сопротивления при его течении в магнитном поле токамака. Разработана конструктивная схема модуля литиевого дивертора новой модификации. На следующих этапах работы предполагается спроектировать и изготовить макет литиевого дивертора на основе КПС с системой термостабилизации парогазовой смеси низкого давления и провести его стендовые испытания для оценки эффективности системы охлаждения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58519X0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Azizov E.A., Buzhinskij O.I., Gladush G.G., Dokouka V.N., Kovan I.A., Semenets Yu.M., Khayrutdinov R., Yagnov V.A., Velikhov E.P., Glukhikh V.A., Krilov V., Mineev A., Filatov O.G., Dvorkin N.Ya., Leikin I.N., Obysov N.A., Shkolnik V.S., Shestakov V., Tazhibayeva I., Tikhomirov L.N., Cherepnin Yu.S.** Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basis parameters. — *Fusion Engineering and Design*, 2001, vol. 56—57, p. 831—835.
2. **Azizov E.A., Dokouka V.N., Shestakov V., Shkolnik V., Tazhibayeva I., Velikhov E. et al.** Kazakhstan tokamak for material testing. — *Plasma Devices and Operations*, 2003, vol. 11(1), p. 39—55.
3. **Tazhibayeva I.L., Azizov E.A., Krylov V.A., Shkolnik V.S., Velikhov E.P., Obysov N.A., Tukhvatulin Sh.T., Tikhomirov L.N., Shestakov V.P., Filatov O.G.** KTM Experimental complex project status. — *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, p. 746—750.
4. **Азизов Э.А., Велихов Е.П., Тажибаева И.Л., Школьник В.С. и др.** Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы управляемого термоядерного синтеза. — Алматы: Изд-во Glory K, 2006. 284 с.
5. **Tazhibayeva I., Lyublinski I., Vertkov A., Lazarev V., Azizov A., Mazzitelli G., Agostini P.** Mock-up divertor of KTM tokamak on the base of lithium CPS. — *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 60, № 2, p. 554—557.
6. **Lyublinski I., Vertkov A., Evtikhin V., Balakirev V., Ionov D., Zharkov M., Tazhibayeva I., Mirnov S., Khomiakov S., Mitin D., Mazzitelli G., Agostini P.** Module of lithium divertor for KTM tokamak. — *Fusion Engineering and Design*, 2012, vol. 87, p. 1719—1723.
7. **Lyublinski I., Vertkov A., Tazhibayeva I., Shapovalov G., Kulsartov T., Dyachenko V., Lazarev V., Azizov A., Mazzitelli G., Agostini P.** Status of design and experimental activity on module of lithium divertor of KTM tokamak. — *Fusion Engineering and Design*, 2013, vol. 88, p. 1862—1865.
8. **Lyublinski I., Vertkov A., Mirnov S., Lazarev V.** Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium. — *J. of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, p. 1156—1159; DOI:10.1016/j.nucmat.2014.12.017.
9. **Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Vertkov A.V., Ezhov N.I., Shcherbakov V.M.** Experimental study of lithium MHD flow in slotted channel from V—4Ti—4Cr alloy. — *Fusion Engineering and Design*, 2005, vol. 75—79, p. 1071—1074.
10. **Morgan T.W., Kvon V., Rindt P. et al.** Liquid metals as a divertor plasma facing material explored using the Pilot-PSI and Magnum-PSI linear devices. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2018, vol. 60(1), p. 014025; DOI: 10.1088/1361-6587/aa86cd.
11. **Vertkov A., Lyublinski I., Mazzitelli et al.** Liquid tin limiter for FTU tokamak. — *Fusion Engineering and Design*, 2017, vol. 117, p. 130—134; DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.01.041.
12. **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.

13. **Вертков А.В., Люблинский И.Е., Комов А.Т. и др.** Применение диспергированного газожидкостного потока для охлаждения жидкометаллического лимитера токамака Т-10. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 57—64.
14. **Mirnov S.V., Komov A.T., Varava A.N. et al.** Experimental investigation of heat transfer of highly loaded structure elements upon cooling by a two-component gas-liquid flow. — J. of Physics: Conf. Series, 2018, vol. 1128, p. 012128.
15. **Vertkov A., Lyublinski I.** Experience in the development of liquid metal plasma facing elements based on capillary-porous structures for a steady-state tokamak (survey). — Physics of Atomic Nuclei, 2018, vol. 81, № 7, p. 1000—1007.



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



Михаил Юрьевич Жарков, ведущий инженер-конструктор, лауреат премии в области физики и технологии токамаков им. Э.А. Азизова 2017 г.; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1А, Россия
MG-dist@yandex.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



Александр Вячеславович Берлов, ведущий инженер-технолог; АО «Красная Звезда», 115230 Москва, Электролитный проезд 1А, Россия



Ирина Лашкаровна Тажибаева, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора филиала Института атомной энергии НЯЦ РК, исполнительный директор Центра безопасности ядерных технологий; 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 10, ВКО, Республика Казахстан
tazhibayeva@ntsc.kz



Юрий Валентинович Понкратов, н.с.; Институт атомной энергии НЯЦ РК, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 10, ВКО, Республика Казахстан
ponkratov@nnc.kz



Юрий Николаевич Гордиенко, начальник группы лаборатории внутриканальных испытаний; Институт атомной энергии НЯЦ РК, 071100 Курчатов, ул. Красноармейская 10, ВКО, Республика Казахстан
gordienko@nnc.kz

Статья поступила в редакцию 10 июля 2019 г.
После доработки 11 августа 2019 г.
Принята к публикации 30 сентября 2019 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 4, с. 5—13.