

УДК 621.539.634:669-154

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ СТАЦИОНАРНОГО ТОКАМАКА (Обзор)

*А.В. Вертков<sup>1</sup>, И.Е. Люблинский<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>АО «Красная Звезда», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Достижение стационарного режима функционирования термоядерного реактора ведёт к необходимости развития в области конструкции и выбора материалов для элементов, контактирующих с плазмой. В этом смысле наиболее перспективным решением является концепция использования капиллярно-пористых систем (КПС) с жидким металлом (в первую очередь с литием), которые обеспечивают самовозобновление поверхности элементов, контактирующих с плазмой, замкнутый оборот в них продуктов коррозии, повышение параметров плазмы и способствуют достижению постоянного режима её горения. Кроме того, проблема отвода приходящего из плазмы потока энергии высокой степени удельной плотности (20—30 МВт/м<sup>2</sup>) и поддержания на приемлемом уровне температуры поверхности элементов, контактирующих с плазмой, может быть решена введением специальной системы отвода тепла. В обзоре рассматриваются опыт развития, создания и экспериментального исследования жидкометаллических КПС, базирующийся на результатах испытания моделей элементов, контактирующих с плазмой, с системами термостабилизации в стационарных условиях для токамаков Т-11М, Т-10, FTU и КТМ, и различные аспекты применения жидких металлов.

**Ключевые слова:** литий, жидкий металл, капиллярно-пористая система, токамак, взаимодействие плазмы с поверхностью, активное охлаждение.

## EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF LIQUID METAL PLASMA FACING ELEMENTS BASED ON CAPILLARY PORE STRUCTURE FOR STEADY STATE OPERATING TOKAMAK (Overview)

*A. V. Vertkov<sup>1</sup>, I. E. Lyublinski<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup>JSC «Red Star», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPh», Moscow, Russia

Realization of steady-state operation of fusion reactor leads to the necessity of development of essentially new design and material for plasma facing elements (PFE). In this sense the most perspective solution is the concept of use of capillary-porous system (CPS) with liquid metal that provide PFE surface self-renewal, closed circulation of their corrosion products, plasma performance improvement and promote achievement of practically stationary modes of plasma burning. Furthermore, the problem of power exhaust with high specific density (20—30 MW/m<sup>2</sup>) and upkeep of a comprehensible level of temperature on PFE surface can be overcome by the introduction of heat removal system into PFE design. Experience in development, creation and experimental study of CPS based models of steady-state operating lithium PFE with systems of thermal stabilization for T-11M, T-10, FTU and KTM and different aspects of liquid metal application are considered.

**Key words:** lithium, liquid metal, capillary-porous system lithium, tokamak, plasma-surface interaction, active cooling.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-5-13

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время установлено, что тепловой поток на внутрикамерные элементы (ВЭ) токамака не снижается с увеличением малого радиуса камеры, как надеялись ранее, и заметно возрастает с ростом мощности нагрева плазменного шнура. Это приводит к необходимости разработки новых материалов и конструкций элементов камеры, обращённых к плазме, для обеспечения работы стационарного термоядерного реактора, в котором тепловые потоки могут достигать десятков МВт/м<sup>2</sup>, а использование традиционных подходов не отвечает предъявляемым требованиям.

Одним из перспективных решений этой проблемы является использование в качестве материала ВЭ жидких металлов в матрице из капиллярно-пористых материалов (КПС), позволяющих создать на их основе самообновляющиеся конструкции с большим ресурсом работы. Одновременно реализуется замкнутый цикл циркуляции продуктов эрозии ВЭ в камере. В качестве наиболее подходящего жидкого металла для реализации этой концепции рассматриваются литий и, возможно, сплав олова и лития (Sn—25% ат. Li). Было пока-

зано, что введение лития в периферийную плазму приводит к проявлению эффекта экранирования проникновения тяжёлых примесей в плазменный разряд. В это же время сам литий не проникает в центральную область плазмы. Такое влияние лития сказывается на существенном улучшении параметров плазмы и способствует достижению стационарного режима горения. Создание элементов, обращённых к плазме стационарного термоядерного реактора, требует решения вопроса вывода высоких удельных потоков энергии уровня 20—30 МВт/м<sup>2</sup> при приемлемом уровне температуры поверхности, что может быть достигнуто включением в их конструкцию системы охлаждения подходящим теплоносителем. Другим решением может быть снижение удельных потоков на поверхность ВЭ за счёт переизлучения на атомах лития большей части выходящего из плазмы потока энергии на общую поверхность камеры. Осуществимость этого подхода продемонстрирована экспериментально в токамаках и плазменных ускорителях.

Накопленный опыт разработки исследования ВЭ для токамаков Т-11М, Т-10, FTU, КТМ и стелларатора TJ-II на основе КПС с жидким литием позволяет разработать обоснованную концепцию внутрикамерных элементов стационарного реактора токамака типа ДЕМО и токамака — источника быстрых нейтронов ТИН.

Создание ВЭ для стационарного токамака-реактора типа ДЕМО на основе жидких металлов требует комбинированных усилий по изучению плазмозфизических аспектов, процессов взаимодействия плазма—стенка, разработки конструкций и конструкционных материалов ВЭ, разработки технологических приёмов работы с жидкими металлами в условиях токамака.

### КПС С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ КАК ОСНОВА ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время существуют два подхода к использованию жидких металлов в токамаке — быстротекущий по поверхности ВЭ поток жидкого металла [1] и статический или медленно текущий жидкий металл в матрице КПС [2—5]. Исходя из анализа достоинств и недостатков этих подходов, в России принята за основу концепция использования КПС с жидким литием [5].

Основным преимуществом КПС является их способность за счёт капиллярных сил постоянно поддерживать и возобновлять защитную плёнку жидкого металла на поверхности ВЭ, стабилизировать жидкий компонент при воздействии внешних сил, формировать плёнку жидкого металла на поверхности ВЭ различной формы и ориентации в пространстве. В результате этого плазма взаимодействует только с жидким компонентом и не воздействует на основу КПС. Экспериментально показано, что спектральные линии основы КПС отсутствуют при воздействии плазмы как в условиях токамака [6—8], так и в экспериментах, моделирующих срывы и переходные процессы на плазменных ускорителях [8]. Кроме того, эрозия жидкого металла с поверхности ВЭ сильно подавляется капиллярными силами [7]. Например, при одинаковых условиях удельные потери лития с поверхности КПС при радиусе пор 100 мкм составляют 2 мг/см<sup>2</sup>, а с поверхности свободного расплава лития — >50 мг/см<sup>2</sup>.

Защитные свойства лития на основе испарения и переизлучения в паре лития приходящего потока энергии продемонстрированы в экспериментах при облучении литиевых КПС пучком электронов мощностью до 30 МВт/м<sup>2</sup> и на плазменных ускорителях при тепловых потоках 15 МДж/м<sup>2</sup>.

Как показывает анализ [9—11], наиболее предпочтительной основой КПС с точки зрения её капиллярных и гидравлических параметров, а также устойчивости к внешним воздействиям является волокнистая структура типа сетки или войлока (рис. 1).

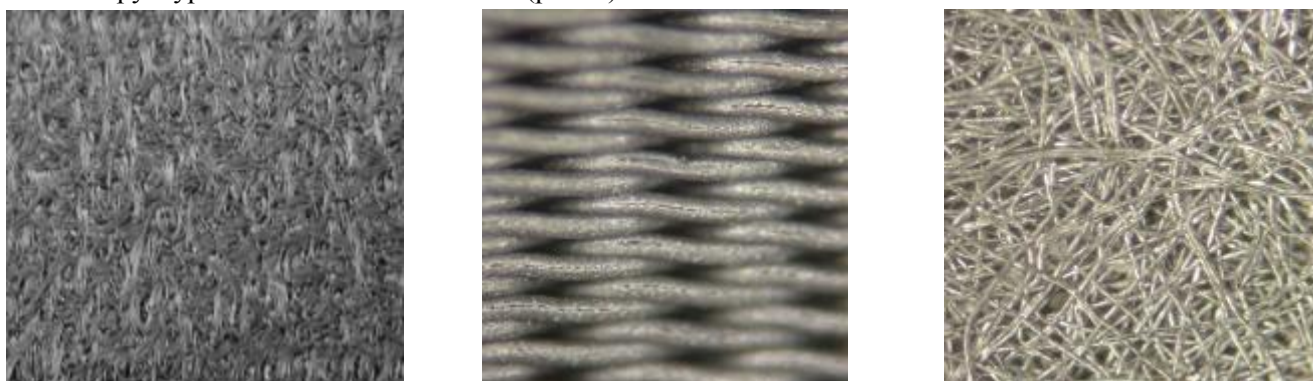


Рис. 1. КПС на основе волокнистых материалов

Важнейшим свойством этой основы КПС является её высокая устойчивость к разрушению за счёт термического расширения и усталостных эффектов по сравнению с компактными твёрдыми материалами. Исходя из расчётных оценок для такого типа КПС из тугоплавких материалов, максимальный тепловой поток на поверхность, не приводящий к разрушению, может достигать  $100 \text{ МВт/м}^2$ , что значительно выше показателей для любого компактного металла. Кроме того, локальное разрушение волокон не приведёт к разрушению КПС как единого целого и не нарушает его функциональных качеств. Пористые системы также более стойки к радиационному облучению и распуханию. Высокая релаксационная способность волокнистых КПС практически исключает проблемы их совместимости при контакте с другими элементами конструкции (отсутствуют механические напряжения на границе раздела материалов).

### ОПЫТ СОЗДАНИЯ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЛИТЯВЫХ КПС

Исследования влияния жидких металлов на плазму токамака и воздействия плазмы на поверхность ВЭ на основе жидких металлов могут быть успешно реализованы на малых и средних токамаках с длительностью разряда 1—2 с. В России к настоящему времени разработана и успешно испытана серия ВЭ (лимитеров) на основе литявых КПС для токамаков Т-11М и Т-10, а также европейских установок FTU и TJ-II (рис. 2) [6, 12, 13].

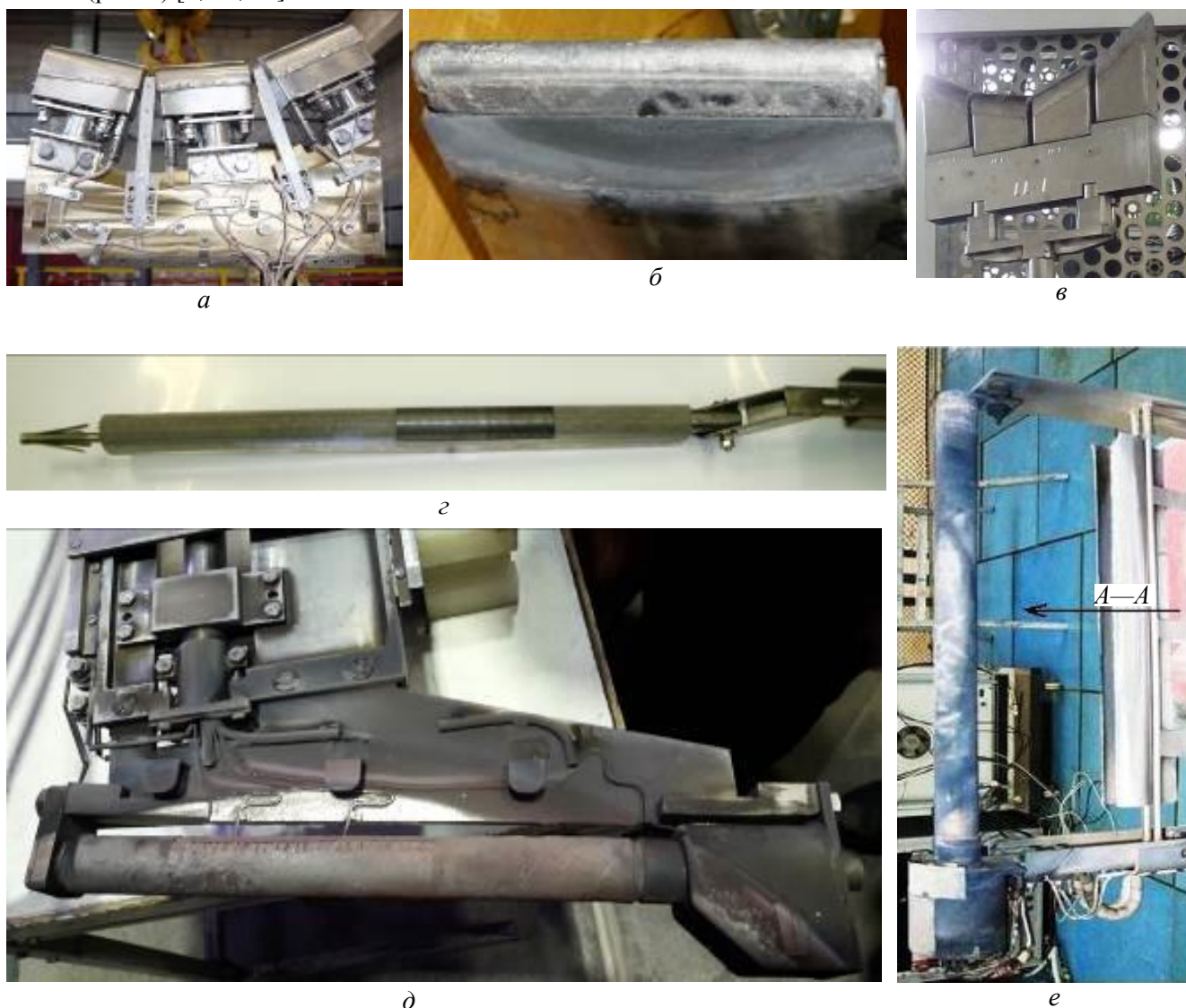


Рис. 2. Литявые лимитеры нижнего порта FTU (а), нижнего порта TJ-II (б), нижнего порта Т-11М (в), нижний продольный Т-11М (г), верхнего порта Т-10 (д), экваториального порта Т-11М, А—А — направление движения литявого лимитера (е)



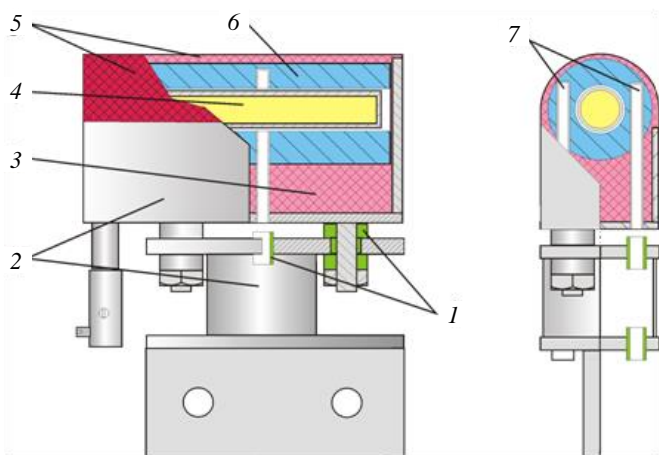


Рис. 3. Схема жидкометаллического лимитера: 1, 2 — элементы крепления; 3 — питающая ёмкость с жидким металлом и транспортной КПС; 4 — электрический нагреватель; 5 — КПС поверхности; 6 — теплоаккумулирующие элементы; 7 — термометр

элементу) и, как показали эксперименты, достаточна для таких длительностей разряда. Перемещение с помощью специального механизма относительно плазменного шнура позволяет регулировать падающий на их поверхность тепловой поток. Такие устройства универсальны, не дороги и могут вводиться в камеру токамака из верхнего, нижнего и экваториальных портов. Использование таких конструкций позволило полностью исключить разбрызгивание жидкого металла, неконтролируемое его поступление в плазму и долговечность. В сочетании со шлюзовым устройством обеспечивается возможность введения и извлечения лимитеров без нарушения вакуума в камере токамака, выполнения ремонта, очистки поверхности и пополнения запаса жидкого металла. Кроме того, при соответствующем подборе конструкционных материалов в них может быть использован любой легкоплавкий металл.

Все они имеют общую конструктивную схему (рис. 3), включающую КПС поверхности толщиной 1 мм с жидким металлом, питающую ёмкость жидкого металла, контактирующие с КПС теплоаккумулирующие элементы, электрический нагреватель для задания необходимого исходного уровня температуры (выше температуры плавления жидкого металла), элементы диагностики (термометры, датчики Ленгмюра) и крепления к механизму позиционирования относительно плазменного шнура.

Пассивная стабилизация температуры поверхности лимитера на приемлемом уровне (500—600 °С) при взаимодействии с плазмой осуществляется за счёт отвода тепла теплопроводностью к элементам конструкции (теплоаккумулирующему элементу) и, как показали эксперименты, достаточна для таких длительностей разряда. Перемещение с помощью специального механизма относительно плазменного шнура позволяет регулировать падающий на их поверхность тепловой поток. Такие устройства универсальны, не дороги и могут вводиться в камеру токамака из верхнего, нижнего и экваториальных портов. Использование таких конструкций позволило полностью исключить разбрызгивание жидкого металла, неконтролируемое его поступление в плазму и долговечность. В сочетании со шлюзовым устройством обеспечивается возможность введения и извлечения лимитеров без нарушения вакуума в камере токамака, выполнения ремонта, очистки поверхности и пополнения запаса жидкого металла. Кроме того, при соответствующем подборе конструкционных материалов в них может быть использован любой легкоплавкий металл.

### ОПЫТ СОЗДАНИЯ ВЭ С АКТИВНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Создание прототипов стационарно работающих ВЭ для токамаков Т-11М, FTU, КТМ [14—17] позволило управлять температурой поверхности с помощью системы активной термостабилизации и исследовать возможность вывода энергии с различными типами теплоносителей. Свойства КПС с жидким металлом позволяют создавать тонкостенные конструкции, в которых отвод тепла производится к теплоносителю, а градиент температур гораздо ниже по сравнению с конструкциями на основе твёрдых металлов. Это позволяет более эффективно контролировать температуру поверхности при тепловых потоках уровня десятков МВт/м<sup>2</sup>.

Созданные модели стационарных ВЭ на основе литиевых КПС для токамаков Т-11М и FTU (рис. 4) обеспечивают работу в интервале температуры 200—550 °С при стационарных тепловых потоках до 10 МВт/м<sup>2</sup>. При этом разогрев лимитера до исходной температуры 200 °С и последующее поддержание температуры поверхности в заданном интервале при взаимодействии с плазмой осуществляются за счёт прокачки теплоносителя. Теплоносителем служит перегретая вода при давлении до 4 МПа и скорости расхода 0,05—0,5 л/с.

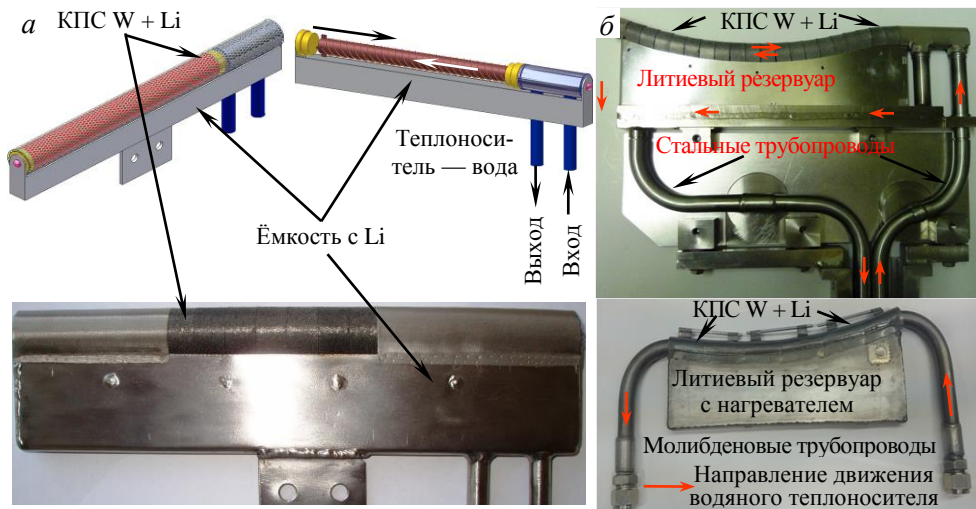


Рис. 4. Литиевые лимитеры токамака Т-11М (а) и FTU (б) с активным охлаждением водой

При этом разогрев лимитера до исходной температуры 200 °С и последующее поддержание температуры поверхности в заданном интервале при взаимодействии с плазмой осуществляются за счёт прокачки теплоносителя. Теплоносителем служит перегретая вода при давлении до 4 МПа и скорости расхода 0,05—0,5 л/с.

Испытания лимитеров показали возможность поддержания температуры поверхности с помощью теплоносителя.

В прототипе стационарно работающего лимитера на основе КПС с оловом, созданном для токамака FTU (рис. 5), была использована комбинированная система термостабилизации. В связи с более высокой температурой плавления олова (232 °С) исходная температура обеспечивалась электрическим нагревателем, отвод тепла в процессе разряда производился двухфазным теплоносителем на основе мелкодисперсного водяного спрея со скоростью расхода 0,05 л/с. Это позволило снизить давление в канале теплоносителя до уровня 0,2 МПа, обеспечить возможность быстрой реакции системы на величину входящего теплового потока. Отвод энергии от приёмной поверхности лимитера производится за счёт испарения мелких капель жидкой фракции теплоносителя, что является более эффективным процессом по сравнению с процессом отвода за счёт теплопроводности к однофазному жидкому теплоносителю. Лимитер был рассчитан на работу в интервале температуры приёмной поверхности 240—900 °С. Испытания лимитера в настоящее время продолжаются.

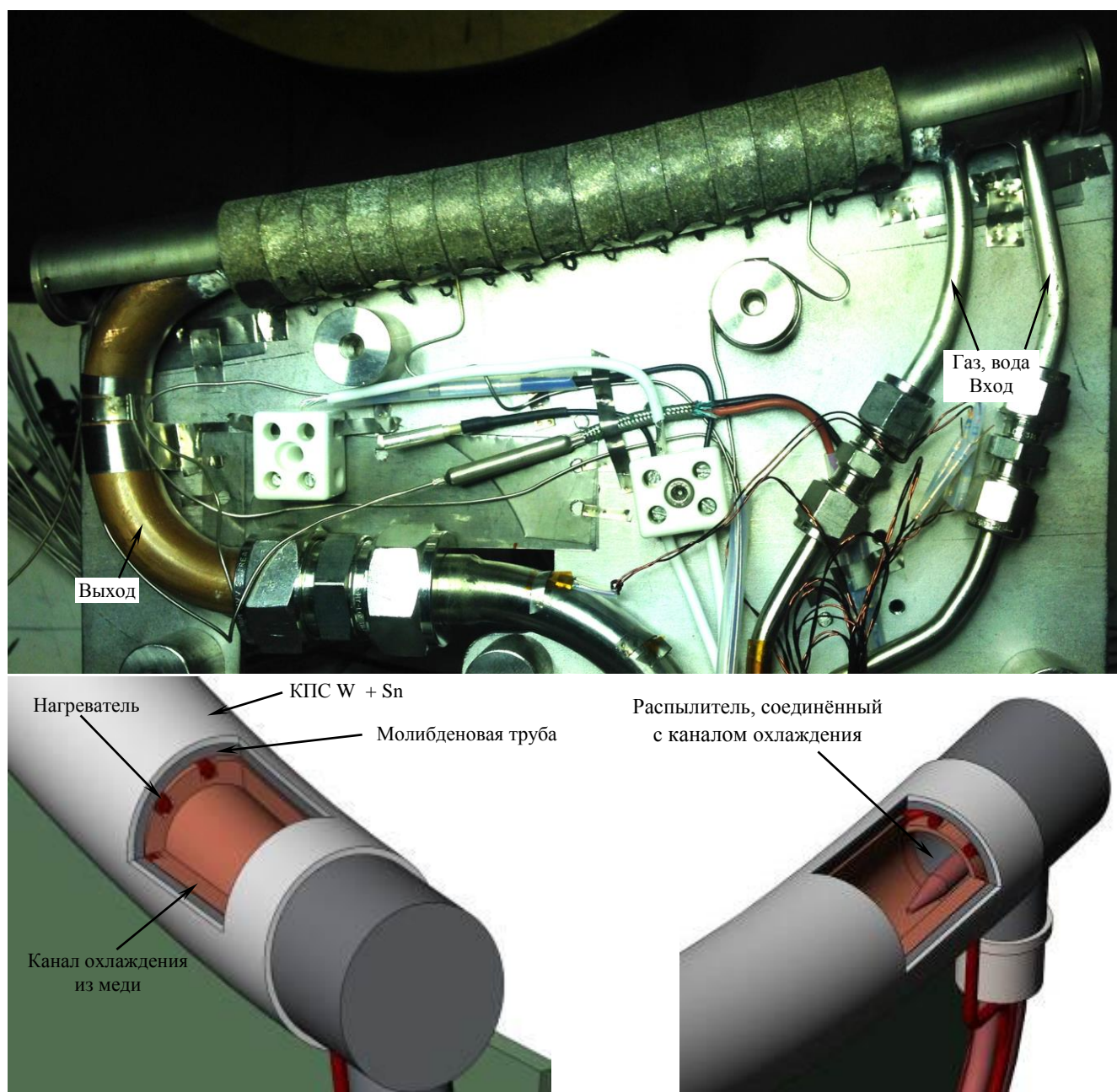


Рис. 5. Лимитер токамака FTU на основе КПС с оловом и двухфазным теплоносителем



В прототипе модуля дивертора токамака КТМ на основе литевой КПС (рис. 6) была предпринята попытка использования жидкометаллического теплоносителя (эвтектический сплав 22% Na + 78% K) с давлением в канале 0,2—0,5 МПа и расходом 0,1—1,5 л/с. В этом случае использовались преимущества жидких металлов (высокие теплофизические свойства, высокая температура кипения) при отводе больших тепловых потоков. К сожалению, проведение испытаний в полном объеме отложено до начала старта кампании токамака с полноценным плазменным разрядом. В настоящее время испытан неохлаждаемый вариант приёмного элемента модуля дивертора на основе КПС с литием.

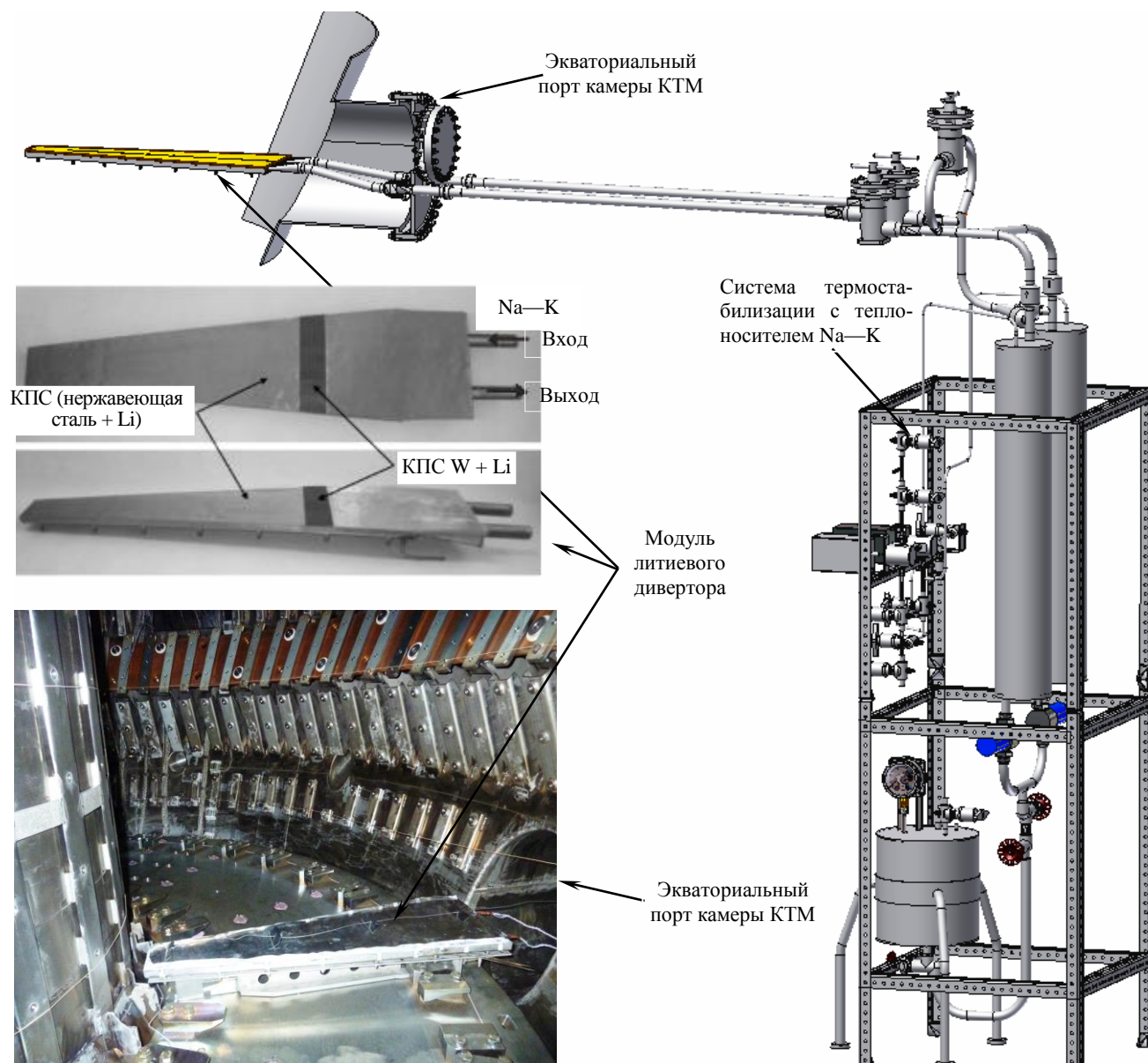


Рис. 6. Модуль литиевого дивертора токамака КТМ

Опыт по разработке, созданию и испытанию в условиях токамака прототипов стационарных ВЭ может послужить основой для разработки и создания ВЭ стационарных токамаков-реакторов. Он может быть с успехом использован для моделирования и исследования процессов взаимодействия ВЭ с плазмой и процессов вывода энергии в стационарном режиме работы на линейных плазменных установках при использовании мишеней с активным охлаждением различными теплоносителями, что является необходимым этапом перехода к испытаниям ВЭ на основе жидких металлов в больших токамаках с длительностью плазменного разряда десятки секунд и более.

Стационарно работающие ВЭ токамака-реактора должны иметь в своём составе систему вывода энергии на основе теплоносителя, систему подачи жидкого металла для подпитки и удаления продуктов эрозии внутрикамерных конструкций, систему рекуперации термоядерного топлива.

## ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ЦИРКУЛЯЦИИ ЛИТИЯ В КАМЕРЕ ТОКАМАКА

Главным условием стационарного либо квазистационарного функционирования токамака-реактора является жёсткое требование удаления из камеры на протяжении всего рабочего цикла продуктов её эрозии. Другое требование, которое должно выполняться параллельно с этим, — удаление «лишнего горючего» — изотопов водорода с их последующей рекуперацией и возвращением в цикл. Использование лития как геттера позволяет надеяться решить эти задачи одновременно. В России интенсивно разрабатывается концепция замкнутого цикла циркуляции лития в камере токамака, которая может послужить основой подхода к использованию жидких металлов с низким зарядовым числом в качестве материала, обращённого к плазме, и позволит решать проблемы организации стационарной работы термоядерного реактора. На рис. 7 показана возможная схема реализации этой концепции. Следуя этой схеме, инжекция лития в диверторный слой (SOL) токамака осуществляется литиевым эмиттером вертикального исполнения. Литий ионизуется электронным ударом, растекается в виде ионов в SOL вдоль магнитных силовых линий (стрелки) и собирается приёмными частями дивертора (диверторными пластинами), покрытыми жидким литием. Некорональное излучение частично ионизованного лития охлаждает при этом плазму SOL, снижая тем самым тепловые нагрузки, приходящиеся на элементы дивертора. Захваченное литием термоядерное топливо выделяется в системе рекуперации и возвращается в плазму. Такой подход позволяет существенно сократить количество жидкого металла, необходимого для работы реактора, исключить неконтролируемое накопление как лития, так и топлива в камере.

Возможность реализации этой концепции продемонстрирована в экспериментах на российских токамаках T-11M и T-10 с использованием лимитеров на основе литиевых КПС (рис. 8).

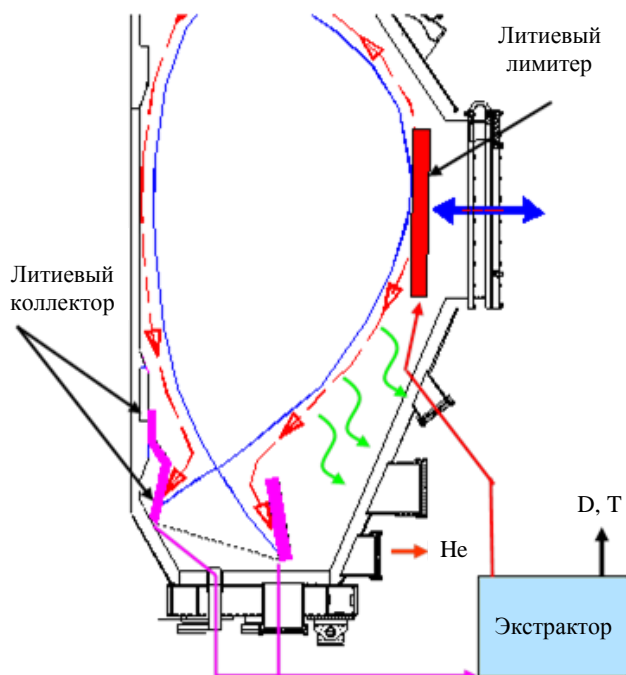


Рис. 7. Схема реализации концепции замкнутого цикла циркуляции лития в токамаке

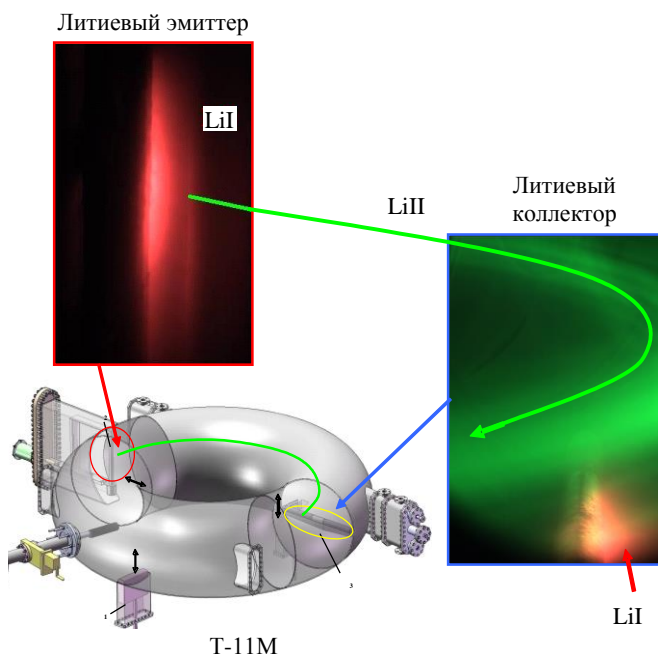


Рис. 8. Реализация замкнутого цикла циркуляции лития в токамаке T-11M

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В СОСТАВЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКА

Как показали проведённые эксперименты по исследованию переноса лития в камере токамака, часть потока атомов лития (~10%) может достигать стенки камеры и выпадать из циркуляционного контура, что приводит к его накоплению. Поэтому были разработаны методы и устройства удаления накопившегося лития с внутрикамерной поверхности.

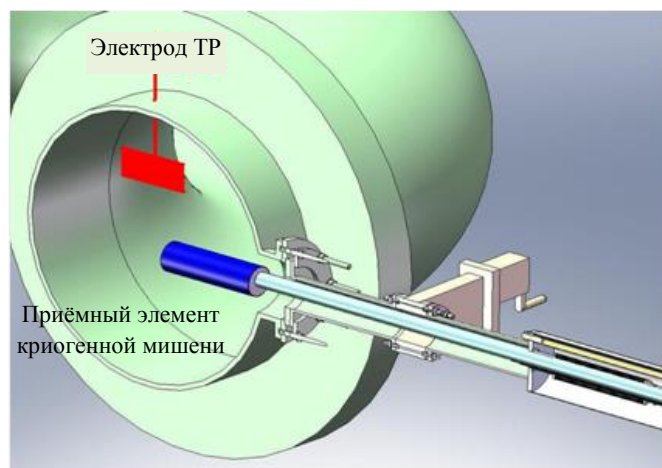


Рис. 9. Охлаждаемый коллектор лития токамака T-11M

Удаление лития производилось в плазме тлеющего разряда, широко используемой для подготовки камеры к штатным плазменным разрядам. В качестве устройств, собирающих литий, использовались охлаждаемые литиевые коллекторы, захватывающие распыленный с поверхности камеры литий и имеющие возможность быть удаленными из камеры через шлюзовое устройство без нарушения вакуума в токамаке. Вариант такого коллектора показан на рис. 9.

Эффективность такого метода удаления лития составила 3,5 мг/ч, что соответствовало количеству лития, накопившегося на стенках за ~200 штатных разрядов.

Другим важнейшим аспектом в использовании жидких металлов является выбор конструкционных материалов ВЭ, совместимых с жидкими металлами, которые предполагается использовать при создании стационарно работающих устройств. Экспериментально установленные температурные границы совместимости конструкционных материалов с жидкими металлами приведены в таблице.

Температурные границы совместимости конструкционных материалов с жидкими металлами

Жидкий металл	Конструкционный материал	Температурный предел, °C
Литий	Ферритная и ф/м стали	800
	Аустенитные стали	700
	Ванадиевые сплавы	900
	Молибденовые сплавы	1200
	Вольфрамовые сплавы	1500
	Угол смачивания $Q \sim 0$	
Олово	Растворение большинства конструкционных материалов при смачивании при $T > 600$ °C	
	Сплавы Mo и W совместимы при $T > 1000$ °C. Угол смачивания $Q \sim 30-40^\circ$	
Сплав Li—Sn	Температурный предел совместимости большинства конструкционных материалов ниже, чем для чистого олова	
	Сплавы Mo и W совместимы при $T > 1000$ °C. Угол смачивания $Q \sim ?$ (возможно $< 30^\circ$ )	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющийся в России опыт по разработке, созданию и испытанию ВЭ на основе КПС с жидкими металлами, разработка и экспериментальное подтверждение концепции замкнутого контура циркуляции лития в камере токамака, разработка и использование методов применения жидких металлов в токамаке позволили заложить фундамент для дальнейшей разработки ВЭ стационарных токамаков-реакторов типа ДЕМО и ТИН.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 15-12-30027).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nygren R.E., Tabares F.L. Liquid surface for fusion plasma facing components. — J. Nucl. Mater. Energy, 2016, vol. 9, p. 6—21.
2. Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T. et al. Recent lithium experiments in tokamak T-11M. — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, p. 224—228.
3. Azizov E. et al. Li collection experiments on T-11M and T-10 in framework of Li closed loop concept. — Fus. Eng. Des., 2012, vol. 87, p. 1747—1754.
4. Mirnov S.V., Azizov E.A., Evtikhin V.A., Lazarev V.B., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al. — Plasma Phys. Contr. Fusion, 2006, vol. 48, p. 821.
5. Mirnov S.V. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 876.



6. Apicela M.L., Lazarev V., Lyublinski I.E. et al. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 386—388, p. 821—823.
7. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A. — Plasma Devices and Operation, 2009, vol. 17(1), p. 42.
8. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A. — Plasma Devices and Operation, 2009, vol. 17(4), p. 265.
9. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al. — IAEA-CN-77/EXP4/21, IAEA, 2001.
10. Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al. — IAEA-CPS-19/CD, FT/P1-17, IAEA, 2003.
11. Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Mazzitelli G. et al. — Fus. Eng. Des., 2007, vol. 82, p. 1627—1633.
12. Tabarés F.L., Tafalla D., Oyarzabal E. et al. — IAEA, CPS-19/CD, EX/P5-36, IAEA, 2012.
13. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Mirnov S.V., Vershkov V.A. et al. Complex of lithium and tungsten limiters for 3 MW of ECR plasma heating in T-10 tokamak. Design, first results. — Nuclear Fusion, 2017, vol. 57, № 6, (2017 Nucl. Fusion 57 066006).
14. Lazarev V.B. et al. — In: 35th EPS Conf. on Plasma Phys. Hersonissos, 9—13 June 2008, ECA, vol. 32D, P-4.004.
15. Mirnov S.V. et al. — Fus. Eng. Des., 2010, vol. 85, p. 919—923.
16. Mirnov S.V. et al. — Fus. Eng. Des., 2012, vol. 87, p. 1747—1754.
17. Vertkov A.V. et al. — Fus. Eng. Des., 2014, vol. 89, p. 996—1002.



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

Обзор поступил в редакцию 8 июня 2017 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 3, с. 5—13.