

УДК 539.9.082

## ПРИМЕНЕНИЕ Ga И Li КАК МАТЕРИАЛА ЛИМИТЕРОВ В ТОКАМАКАХ Т-3М И Т-11М

*С.В. Мирнов (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), В.А. Евтихин («Красная Звезда»)*

Работа представляет собой обзор экспериментальных результатов, полученных в опытах по использованию жидких металлов (Ga, Li) в качестве диафрагм токамаков Т-3М и Т-11М. Цель этих экспериментов — оценить перспективность жидких металлов как материалов реакторных конструкций, контактирующих с плазмой. Опыты на токамаке Т-3М показали, что галлиевая капельная диафрагма может успешно функционировать в условиях граничной плазмы токамака в качестве рельсового лимитера. Эксперименты на Т-11М с рельсовой диафрагмой на основе литиевой капиллярной пористой структуры (КПС) показали, что литиевые КПС могут рассматриваться как перспективные материалы для узлов реактора, контактирующих с плазмой. В ходе этих экспериментов была продемонстрирована способность литиевых КПС успешно противостоять срывам в токамаке. Помимо этого исследовались процессы эрозии лития и сорбции им дейтерия и гелия. Было показано, что:

- некорональное излучение лития и примесей защищает поверхность диафрагмы от высоких тепловых нагрузок в ходе срыва. При этом твердая матрица КПС не имела видимых повреждений после более чем 200 разрядных импульсов, сопровождаемых срывами;
- уровень литиевой эрозии примерно соответствует его возможному распылению под влиянием бомбардировки диафрагмы ионами дейтерия и лития (самораспыление);
- для извлечения из литиевой КПС захваченных атомов дейтерия и водорода было достаточно ее прогреть до 400—500 °С, для извлечения гелия — только до 50—100 °С.

Эти результаты создают основу для последующих работ по созданию на основе КПС узлов стационарного токамака-реактора, контактирующих с плазмой.

USE OF Ga AND Li AS LIMITER MATERIALS IN T-3M AND T-11M TOKAMAKS. S.V. MIRNOV, V.A. EVTIKHIN. The paper presents review of liquid metal (LM, Ga, Li) limiter investigations as plasma facing components (PFC) in T-3M and T-11M tokamaks. The tokamak T-3M experiment shows, that Ga droplet limiter can be useful in tokamak scrape off layer (SOL) condition as typical tokamak-rail limiter.

The T-11M experiment with rail Li limiter based on the Capillary-Pore System (CPS) shows that Li CPS can be a perspective material for reactor PFC. An ability of capillary forces to confine the liquid tokamak limiter during disruption was demonstrated. The Li erosion process and tokamak first wall sorption properties were also investigated. The main experimental results are:

- the non coronal lithium and impurities radiation protected the limiter from high power load during disruptions. The solid basis of CPS limiter had no damages after more than  $2 \times 10^2$  shots with disruptions;
- total lithium erosion is close to level deuterium and lithium ions sputtering;
- the recovery temperature of hydrogen isotopes from Li is 320—500 °C (for helium 50—100 °C). Therefore, at high PFC temperatures (400—500 °C) a tritium capture can be minimized.

These results are making a convincing basis for the advance of the liquid lithium PFC for steady state Li-tokamak reactor.

### ВВЕДЕНИЕ

Идея использовать жидкие металлы в качестве материалов, контактирующих с плазмой для снятия высоких тепловых и корпускулярных нагрузок в различных вариантах термоядерных реакторов [1, 2], известна давно. В частности, в проекте первого токамака-реактора УВМАК-1 [3] для этих целей было предложено применить текущую по диверторной пластине пленку жидкого лития. Такой подход соответствует основным реакторным требованиям — обеспечению теплосъема и постоянного самовосстановления рабочей поверхности, контактирующей с плазмой. Кроме того, поток жидкого металла позволяет удалять из объема рабочей камеры примеси и продукты эрозии ее поверхности.

Учитывая эти важные преимущества жидких металлов, в 1980-е годы в РФ были начаты лабораторные исследования свойств литиевых свободно текущих пленок [4]. Параллельно была начата программа по созданию и испытанию галлиевых жидкометаллических лимитеров [5, 6] для токамака Т-3М. Разрабатывались и испытывались два варианта галлиевых лимитеров: в виде пленок и капельной завесы. Первым результатом этих работ стал вывод, что в условиях реальных быстропеременных магнитных полей токамака создать равномерное пленочное течение жидкого металла практически невозможно.

Идея жидкометаллического лимитера токамака в виде капельной завесы [2], позволяющей устранить влияние пондеромоторных сил на движение жидкого металла в магнитном поле, оказалась более практичной. Было продемонстрировано, что капельный галлиевый лимитер по своему влиянию на плазму несущественно отличается от графитового [5], т.е. может быть использован в реальных токамаках.

Другая идея компенсации пондеромоторных сил, возникающих в жидких металлах, состояла в использовании силы поверхностного натяжения в капиллярных каналах так называемых капиллярно-пористых систем (КПС), представляющих собой ячеистые структуры с размером ячейки  $R_{эф} = 5—200$  мкм [7—10]. Хотя скорость движения металла в таком связанном состоянии существенно замедляется по сравнению с капельным потоком и тем самым ослабляется функция теплосъема, но сохраняется важная функция самовозобновления контактной поверхности при взаимодействии с плазмой. Это свойство становится особенно важным, если учесть, что диверторная пластина и первая стенка токамака-реактора, в частности ИТЭРа, должны работать в условиях регулярных малых срывов (элмов), являющихся основной причиной их повышенной эрозии. Не исключено, что именно самовозобновление контактных поверхностей первой стенки и дивертора, взаимодействующих с плазмой, окажется ключевым качеством при создании следующих за ИТЭРом термоядерных реакторов.

В развитие этой идеи в 1998—2004 гг. на токамаке Т-11М [11—18] была выполнена программа по исследованию поведения лимитера на основе КПС, заполненного литием. Ее целью было оценить преимущества и реальные трудности, которые вызовет этот способ введения лития в токамак. Температура лимитера Т-11М в процессе работы, как правило, превышает температуру плавления лития, т.е. литий на поверхности КПС должен находиться в жидком состоянии.

Какие опасения вызывает присутствие в токамаке жидкого металла, взаимодействующего с плазмой? Они группируются вокруг трех основных пунктов:

1. Основным препятствием является отсутствие опыта работы с жидким металлом на больших токамаках, которые формируют основную базу данных ИТЭРа. Главным остается вопрос, совместим ли жидкий металл на стенках камеры с термоядерной плазмой? Не будет ли он, например, разбрызгиваться, чрезмерно загрязнять плазму или запылять диагностические окна?

2. Сколь опасен захват трития жидким металлом и как трудоемки методы его обратного извлечения.

3. Как охлаждать нагретый металл? Для лития, например, в случае аварии возникает опасность пожара при охлаждении реактора водой.

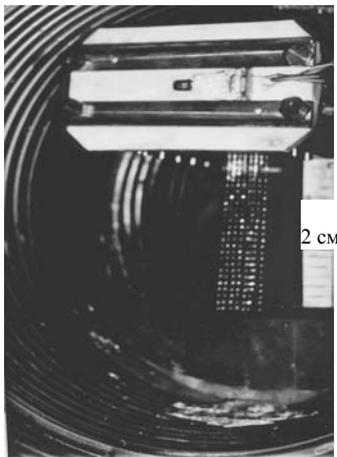
Проведенные исследования позволили получить важную положительную информацию по первым двум пунктам. По поводу съема тепла есть схемы двухконтурных систем охлаждения, практически исключающих контакт лития с водой при аварии.

## СОВМЕСТИМОСТЬ ГАЛЛИЯ С ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА

Эксперименты с капельным лимитером из Ga (точнее, из сплава S-GIS = 67%Ga + +,5%In + 12,5%Sn) проводились на токамаке Т-3М со следующими параметрами:  $R/a = 0,95/0,16$  м,  $B_{\text{top}} = 1$  Тл, ток плазмы  $J_{\text{пл}} \leq 40$  кА, длительность импульса разряда около 70 мс. Плотность потока тепла на лимитеры Т-3М составляла около  $0,5\text{—}1$  кВт/см<sup>2</sup>,  $T_e(0) = 250$  эВ,  $T_e(a) = 15\text{—}30$  эВ [5, 6].

Схема эксперимента приведена на рис. 1 [5]. Роль рельсового лимитера выполнял вертикальный поток капель диаметром 2—4 мм, состоявший из 17 отдельных струй, расположенных в два ряда через 8 мм, общей шириной около 4 см. Скорость капель составляла 2—5 м/с и определялась напором МГД-насоса (см. рис. 1, 2). Капли создавались путем модуляции потока металла с помощью специального магнитного вибратора, возбуждающего в потоке неустойчивость Релея [19].

Получающиеся при этом капли демонстрировали достаточно хорошую регулярность (рис. 2). Образованный ими капельный поток был углублен в плазму на 1,5—2 см. Его влияние на свойства плазмы сравнивалось с влиянием контрольного графитового лимитера аналогичной геометрии. На рис. 3 [5] приведен временной ход основных плазменных параметров: напряжения на обходе, плотности электронов и полных излучательных потерь плазмы для двух таких разрядов.



$B = 1$  Тл,  $f = 600$  Гц,  $v_{\text{Ga}} = 1,8$  м/с

Рис. 2. Галлиевая капельная диафрагма на стенде [6]

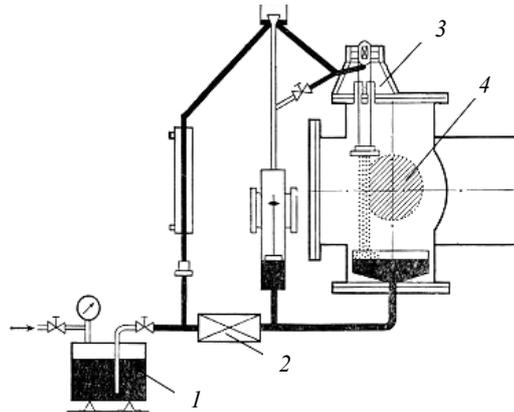


Рис. 1. Схема галлиевого эксперимента на Т-3М [5]: 1 — базовый объем жидкого галлия; 2 — электромагнитный насос; 3 — формирователь капель; 4 — плазменный шнур

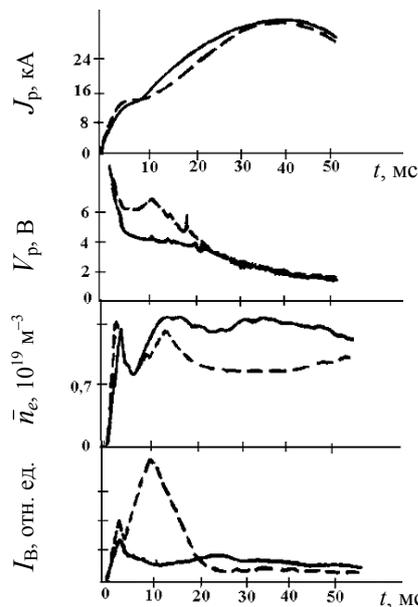


Рис. 3. Сравнение поведения основных параметров разряда Т-3М для случая графитового (—) и Ga-капельного (---) лимитеров:  $I_p$  — ток разряда;  $V_p$  — напряжение обхода;  $n_e$  — средняя плотность электронов;  $I_B$  — интенсивность интегрального излучения [5]

Очевидно, что галлиевый лимитер «проигрывает» в начальной фазе разряда, демонстрируя более высокий уровень излучательных потерь, но «выигрывает» в средней, где их уровень оказывается заметно ниже, чем в графитовом варианте. Электропроводность плазмы в обоих случаях оставалась примерно равной. Эти опыты продемонстрировали практическую возможность создания жидкометаллического лимитера токамака.

Расчеты показали, что, пролетая через плазму, поверхность капель Ga должна нагреваться всего лишь на 100—200 °С, что пренебрежимо мало по сравнению с его температурой кипения (2400 °С), поэтому загрязнением плазмы за счет испарения галлия можно было пренебречь. Однако остался открытым вопрос о распылении и самораспылении Ga в условиях плазменной бомбардировки. Плотность электронов в процессе разряда не возрастала. Этот факт позволяет утверждать, что наиболее опасный коэффициент самораспыления Ga оставался, по крайней мере, меньше единицы. Последующий анализ показал, что на поверхности камеры даже в удаленных от лимитера областях встречались отдельные капельки жидкого металла размером <1 мм, что указывало на вероятное развитие капельной эрозии Ga.

Не исключено, что она имела место в процессе срывов и других МГД-неустойчивостей токамака. Отсюда следует практический вывод, что даже при локальном введении жидкометаллического лимитера нельзя пренебречь миграцией жидкого металла по камере, т.е. функцию коллектора жидкого металла должна выполнять вся камера.

В силу высокой температуры кипения жидкий Ga является наилучшим потенциальным кандидатом для решения задачи энергосъема [6]. Но высокий заряд его ядра  $Z = 31$  и связанная с этим опасность собирания ионов галлия к центру становятся серьезным препятствием для его практического использования в токамаках-реакторах в качестве материала лимитера или диверторных пластин. Рекордсменом в отношении малых  $Z$  среди металлов является, как известно, литий. Отсюда то внимание, которое сегодня ему уделяется.

Учитывая относительно низкую температуру кипения лития (1370 °С), можно было бы заранее предполагать его повышенную эрозию при взаимодействии с плазмой. Однако опыты с Li-лимитером на T-11M [11—18] не обнаружили каких-либо катастрофических проявлений такой эрозии вплоть до температур масштаба 600—700 °С.

## СОВМЕСТИМОСТЬ ЛИТИЯ С ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА

Как известно, опыты на TFTR [20—22] с инъекцией крупинки лития и литиевого аэрозоля (DOLLOP) в процессе разряда показали, что литий хорошо «усваивается» термоядерной плазмой, способствуя созданию переходного слоя между горячей зоной и холодной стенкой без подъема при этом  $Z_{эф}$  в центральных областях шнура. Именно так на TFTR [21] были получены режимы разряда с наибольшим нейтронным выходом и максимальным тройным произведением  $n\tau T$ .

Однако условия на стенке TFTR были далеки от условий стационарного реактора. Графитовая диафрагма и первая стенка, частично покрытые литием, оставались в TFTR материальными поверхностями, которые в основном аккумулялировали

литий, выходящий из плазмы. В стационарных условиях реактора потоки лития из плазмы на стенку и обратно сбалансированы. В таком режиме стенка и диверторные пластины должны быть либо полностью покрыты литием, поступающим из плазмы, либо для предотвращения его разбрызгивания защищены некоторым литийсодержащим покрытием, позволяющим удерживать баланс литиевых потоков.

Одним из вариантов такого защитного покрытия могут быть капиллярные пористые системы (КПС), заполненные литием [7—9]. Они и стали предметом испытаний на Т-11М. Технически они представляли собой заполненные литием слоистые структуры (рис. 4 [10]), образованные большим числом плотно спрессованных металлических (Мо, SS) сеточек с ячейкой от 10 до 100 мк (см. приложение). Будучи смочены литием, они работали как фитили, поставляющие литий из внутренних областей КПС на границу контакта с плазмой в процессе и после разряда.

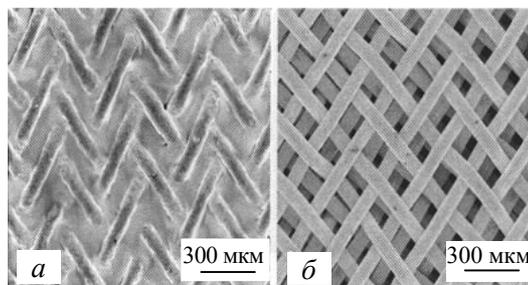


Рис. 4. Микрофотография капиллярной пористой структуры: *a* — заполненной литием, *б* — до заполнения

На рис. 5 [10] изображена принципиальная схема первой стенки и диверторных пластин токамака-реактора, покрытых подобными КПС с литиевым наполнением. Образованный ими внешний литиевый контур предназначен защищать первую стенку от ионной бомбардировки, постоянно возобновляя литий на поверхности, обращенной к плазме. Компенсировать расход лития можно было бы, медленно прокачивая его через КПС. Очистку лития от внедренных D и T предполагается осуществлять в нижней части диверторного объема путем прогрева до температуры  $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (HE + TS). Если перед этим организовать область пониженной температуры ( $< 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), где литий способен селективно захватывать ионы  $\text{D}^+$  и  $\text{T}^+$ , появляется возможность отделить от них гелий, который затем может быть удален с помощью обычной вакуумной откачки.

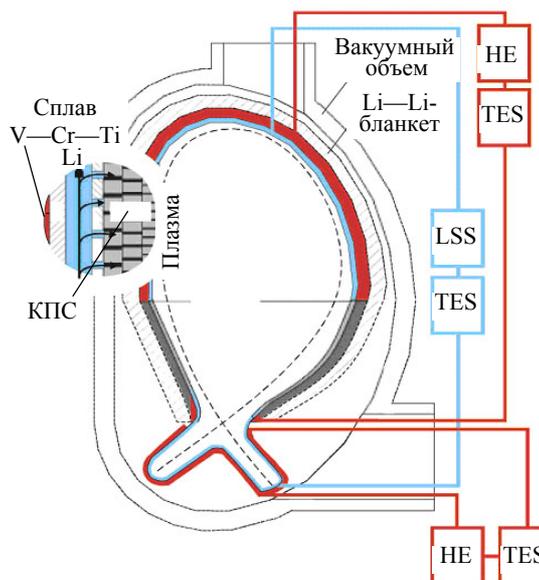


Рис. 5. Принципиальная схема литиевого токамака с первой стенкой, защищенной литиевой КПС, с ее литиевым охлаждением, очисткой лития от трития (HE + TES) и литиевым бланкетом для воспроизводства трития [10]: LSS — система подачи лития; HE — теплообменник; TES — система очистки лития; — контур охлаждения первой стенки дивертора; — КПС — поверхность и система подачи лития

В опытах на Т-11М (ТРИНИТИ) [10—18] предстояло выяснить два основных вопроса: характер поступления лития со стенки в плазму и его последующее поведение в горячем плазменном шнуре. Заранее высказывались опасения, что литий ( $Z = 3$ )

будет собираться к оси шнура, поступая со стенки в плазму спонтанно, неконтролируемым образом, например, в результате:

- развития мощных униполярных дуг;
- локальной «взрывной» эмиссии, наблюдаемой иногда на графите;
- развития микрокапиллярных волн на границе плазма—жидкий металл или вследствие любых других механизмов аномальной эрозии лития.

Сегодня на часть этих вопросов есть ответы.

Эксперименты с литиевым КПС в качестве лимитера проводились на токамаке Т-11М, близком по основным параметрам к Т-3М, а именно:  $R/a = 0,7/0,2$  м,  $B_{\text{top}} = 1$  Тл, ток плазмы  $J_{\text{пл}} \approx 100$  кА и длительность импульса разряда около 0,2 с [12, 17]. Плотность потоков тепла на лимитеры такого токамака, как и в случае Т-3М, составляла около  $1 \text{ кВт/см}^2$  ( $10 \text{ МВт/м}^2$ ).

Предполагается, что примерно такие же удельные тепловые нагрузки будут поступать на диверторные пластины ИТЭРа. Учитывая, что тепловые потоки из плазмы на лимитер направлены в основном вдоль магнитного поля, они должны сильно зависеть от электронной температуры (примерно как  $T_e^{7/2}$ ). В силу этого можно ожидать, что характерные для современных токамаков граничные температуры плазмы  $T_e = 20\text{—}30$  эВ либо сохранятся и в режимах токамака-реактора с развитыми ELM-ами, либо окажутся ниже (за счет роста плотности). Все известные негативные пристеночные явления — дуги, взрывная эмиссия, распыление, микрокапиллярные волны и т.д. зависят от пристеночного электрического потенциала, т.е. в конечном итоге от  $T_e(a)$ . Поэтому можно утверждать, что опыты на Т-11М и Т-3М по изучению свойств жидкометаллических лимитеров проводились в условиях, близких к реакторным или даже более жестких, за исключением эффектов, которые могут возникнуть в стационарных условиях работы и под действием нейтронного излучения.

Схема эксперимента на Т-11М представлена на рис. 6. Она фактически аналогична схеме эксперимента на Т-3М. Подвижный рельсовый лимитер (рис. 7) с контактной поверхностью, представляющей собой литиевую КПС с ячейкой 100 либо 30 мкм, вводился в плазму примерно на 5 см, ограничивая тем самым рабочую апертуру шнура и плазменный ток на уровне  $q(a) = 3\text{—}4$ .

Для сравнения с литиевым лимитером в противоположном патрубке располагался

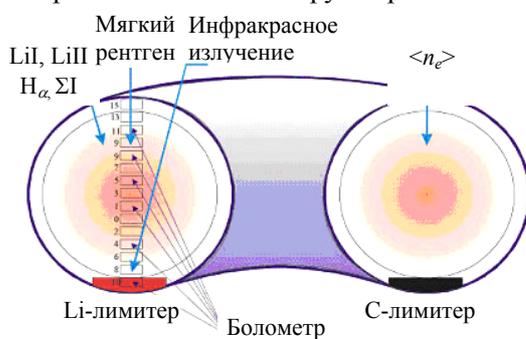


Рис. 6. Схема эксперимента с рельсовым литиевым КПС-лимитером на Т-11М [10]

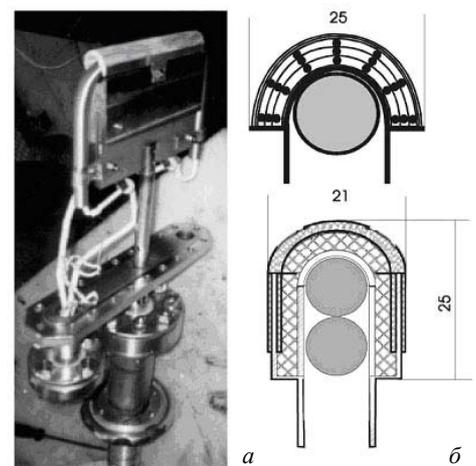


Рис. 7. Общий вид (а) и разрез литиевых КПС-лимитеров (б), применявшихся в опытах на Т-11М: xxx — область, занятая КПС-структурами; ■ — область, занятая подогревателями [10]

обычный графитовый. В теле Li-лимитера были установлены две термопары, позволявшие измерять полную энергию, выпадающую на лимитер в процессе разряда.

Помимо стандартных оптических диагностик (измерения интенсивностей спектральных линий LiI, LiII, интегрального света), регистрирующих поступление лития в разряд, в районе Li-лимитера была установлена 15-канальная болометрическая система и развита специальная инфракрасная диагностика поверхности лимитера, позволявшая определять его поверхностную температуру и, соответственно, мощность тепловыделения в ходе разряда [23].

Было подтверждено, что в устойчивом квазистационарном разряде локальная мощность тепловыделения действительно достигает  $10 \text{ МВт/м}^2$  при эффективной длительности теплового импульса около 50 мс. Температура поверхности увеличивалась при этом примерно на  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . В последующей серии опытов (2002—2004 гг.) длительность разрядных импульсов Т-11М была удлинена до 0,2—0,25 с, что позволило удлинить тепловой импульс до 0,1 с. Чтобы моделировать режим нагрева в импульсах с большей длительностью, осуществлялся предварительный подогрев лимитера с помощью специального нагревателя. В итоге максимальная температура контактной поверхности лития в импульсе достигала  $750 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это было эквивалентно интегральной тепловой экспозиции около 0,4 с при нагреве лития тепловым потоком  $10 \text{ МВт/м}^2$  с начального уровня  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Первым, наиболее важным результатом эксперимента на Т-11М стало то, что в ходе МГД-устойчивых режимов разряда при температурах поверхности лимитера от  $20$  до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  не обнаружилось каких-либо явлений, сопровождаемых спонтанным поступлением лития в плазму. В области выше  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  на поверхности лимитера иногда возникала неустойчивость ионизационного типа [15, 17], имевшая тенденцию к самостабилизации. В режимах без дополнительного подогрева литиевый и графитовый лимитеры работали практически аналогично [12, 13].

## ПОВЕДЕНИЕ ЛИТИЕВОЙ ЭМИССИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛИМИТЕРА

Индикаторами потока лития, поступающего в плазменный шнур, служили свечение спектральных линий нейтрального лития и почти ему пропорциональное интегральное свечение плазмы вблизи лимитера. Подогрев литиевого лимитера приводил к увеличению потока лития в плазму. На рис. 8 [12] приведен временной ход интенсивности интегрального свечения вблизи литиевого лимитера для трех разрядов, отличающихся начальными температурами лимитера ( $T_0$ ). Отчетливо виден рост свечения лития по мере повышения  $T_0$ . Этот эффект наблюдался при

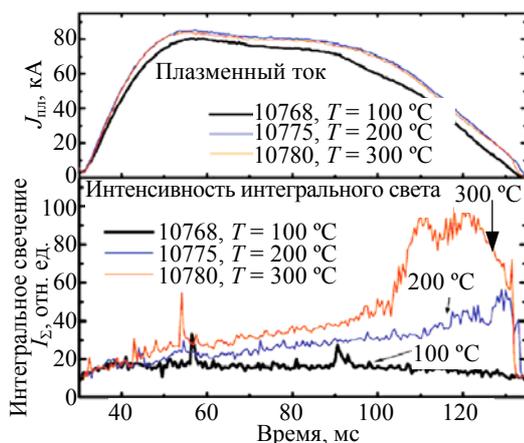


Рис. 8. Временное поведение интенсивности интегрального света в ходе разряда вблизи литиевого лимитера для разных температур предварительного подогрева от  $100$  до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  [12]

использовании в качестве рабочего газа как водорода, так и гелия. Подача отрицательного электрического потенциала между лимитером и стенкой (до 400 В) не влияла существенно на интенсивность свечения лития. Откуда можно было заключить, что литиевая эмиссия слабо зависела от энергии бомбардирующих ионов. Наиболее ярко выраженной оказалась ее зависимость от поверхностной температуры лимитера.

На рис. 9 [16] приведена зависимость интенсивности эмиссии лития (интегрального свечения и интенсивности линии LiI) от температуры поверхности лимитера в диапазоне изменения от 250 до 500 °С, а на рис. 10 — от 375 до 650 °С [17]. На рис. 11 для сравнения приведены полученные в экспериментах с ионными пучками [24] значения коэффициентов распыления  $S_{D^+ \rightarrow Li}$  и самораспыления  $S_{Li^+ \rightarrow Li}$  как функции температуры литиевой мишени.

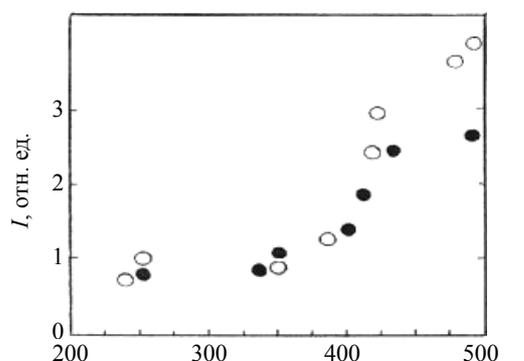


Рис. 9. Зависимость литиевой эмиссии от температуры поверхности лимитера Т-11М [16]: ○ — интенсивность свечения LiI; ● — интегральная интенсивность

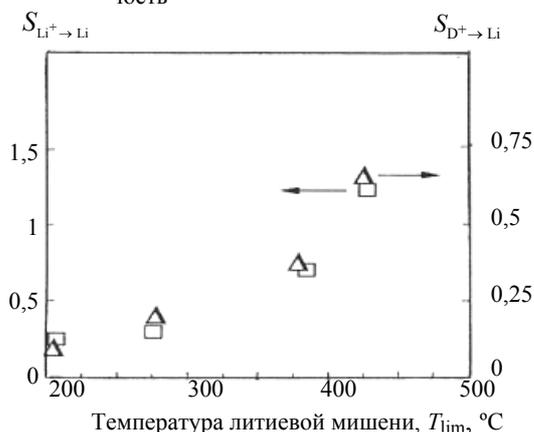


Рис. 11. Зависимость от температуры мишени коэффициентов распыления лития при бомбардировке ионными пучками [24]

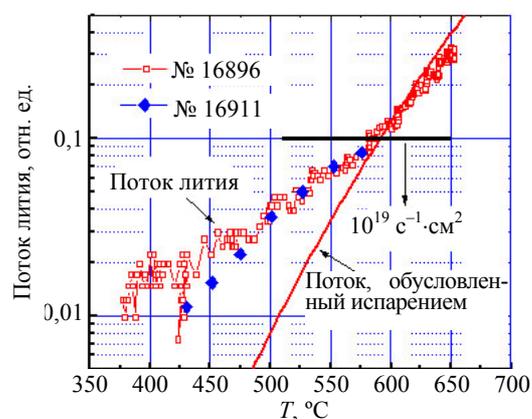


Рис. 10. Зависимость эмиссии лития от температуры КПС поверхности от 375 до 650 °С [17]

Очевидное подобие поведения литиевой эмиссии и коэффициентов распыления позволяет предположить, что в основе наблюдаемой эмиссии лежат процессы ионного распыления. Абсолютные оценки уровня эмиссии лития при температуре лимитера  $T_{lim} < 500$  °С показали, что необходимые для этого коэффициенты распыления не должны были бы превышать 0,5—1 [15], т.е. находились бы на уровне коэффициента самораспыления.

Пик эмиссии лития, возникающий после окончания теплового импульса (см. рис. 8), объясняется литиевой рекомбинацией (MARFE). Выше  $T_0 = 500$  °С

основным источником эмиссии лития должно стать его испарение (см. рис. 10).

Таким образом, повышая начальную температуру лимитера Т-11М, можно было увеличивать поступление лития в разряд. Происходившее при этом увеличение излучения периферии шнура уменьшало тепловую нагрузку на лимитер.

Таким способом за счет переизлучения теплового потока на стенку удалось снизить примерно вдвое нагрузку на лимитер [23]. Можно ожидать, что, увеличивая в будущем длительность теплового импульса, удастся переизлучить на стенку еще большую часть теплового потока, двигаясь в пределе к литиевому излучающему бланкету без добавок тяжелых газов.

В действующих токамаках это, возможно, позволит перейти к так называемым радиационно-улучшенным RI-режимам с пониженным загрязнением центра, а в реакторе — к переизлучающему бланкету. Регулирующим параметром при этом становится время жизни лития  $\tau$  в периферийных слоях плазмы. Если оно мало, литий не успевает ионизоваться до своего равновесного состояния («корональное равновесие»). При этом интенсивность его излучения может на два порядка превысить равновесное [10, 16, 17].

Излучающий бланкет реактора становится реальностью в таких условиях. К сожалению, сегодня нет надежных методов управления удержанием плазмы вблизи границы. Известны лишь некоторые принципиальные возможности подобного управления: локальная эргодизация магнитных полей вблизи границы, управляемые элмы, возбуждение локальной МГД-активности и т.д. Возможным способом инжекции лития в периферийную плазму может оказаться DOLLOP [22] либо капельный лимитер, подобный тому, который применялся в опытах на T-3M с Ga.

Однако при всех вариантах излучающего бланкета полный поток тепла из плазмы должен передаваться через литиевые КПС на стенку или диверторные пластины и далее — в систему охлаждения реактора. Так как литий обладает сравнительно низкой теплопроводностью, толщина литиевых КПС не должна при этом превышать 1—5 мм [16].

На T-11M были проведены испытания лимитеров с тонкими КПС, закрепленными на поверхности массивного молибденового аккумулятора тепла, предназначенного для охлаждения КПС в процессе разряда [17]. Критическим узлом этой схемы и основным предметом проверки стал тепловой контакт между литием и молибденом.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ТОНКИМ КПС-ЛИМИТЕРОМ

Схема одного из таких лимитеров представлена на рис. 12. Его основной элемент — тепловой аккумулятор в виде молибденовой трубки толщиной 3 мм — мог дополнительно охлаждаться либо в процессе эксперимента, либо между разрядными импульсами. Для этой цели в его конструкции был предусмотрен охлаждающий канал. Поверхность аккумулятора отделялась от плазмы КПС-слоем толщиной около 1 мм. Концы КПС-слоя подобно фитилю погружались в резервуар с литием, который должен был компенсировать литиевый расход в процессе взаимодействия с плазмой.

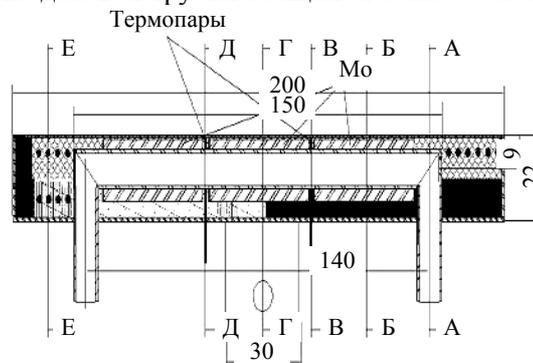


Рис. 12. Схема лимитера с тонким КПС-слоем [17]

Подобная конструкция с охлаждением могла, в принципе, обеспечить стационарный режим работы лимитера Т-11М, однако реальная длительность теплового импульса (0,1 с) не позволяла достичь стационара, поэтому дополнительное охлаждение оказалось излишним.

В экспериментах с одним из первых вариантов конструкции тонкого Li-лимитера с аккумулятором тепловой контакт между ними оказался нарушен. Это вызвало подъем температуры поверхности КПС  $T_{\text{lim}}$  до 700 °С.

На рис. 13, а приведен временной ход  $T_{\text{lim}}(t)$  для такого случая. Можно видеть, что температура  $T_{\text{lim}}$  растет на протяжении импульса  $J_{\text{пл}}(t)$  и остается почти постоянной (650 °С) после его окончания. Следующий улучшенный вариант с более тесной связью КПС и Мо принципиально изменил ход  $T_{\text{lim}}(t)$  (рис. 13, б). Уменьшилась ее абсолютная величина (до 200 °С), и спад  $c(t)$  стал строго следовать за спадом тока  $J_{\text{пл}}(t)$ . В этом случае полное выделение тепла на лимитере ( $\approx 2,4$  кДж) примерно соответствовало 20% от полной энергии, вложенной в плазменный шнур. Зная площадь выделения энергии ( $\approx 30$  см<sup>2</sup>) и время ( $\approx 0,1$  с), можно было рассчитать величину максимальной поверхностной температуры  $T_{\text{lim}}$  в предположении отсутствия теплового контакта Li—Мо и в предположении идеального контакта. В первом случае температура по поверхности составила бы около 600 °С, во втором — 230 °С. Учитывая, что измеренная величина оказалась близка к 200 °С, следует заключить, что тепловой контакт был близок к идеальному. Это открывает перед тонкими КПС-структурами с литием широкие перспективы, в частности, в качестве защитных покрытий первой стенки и диверторных пластин, опирающихся на охлаждаемые поверхности из материалов с высоким  $Z$ . В настоящее время по этой схеме можно было бы создавать стационарные лимитеры для действующих токамаков и стеллараторов.

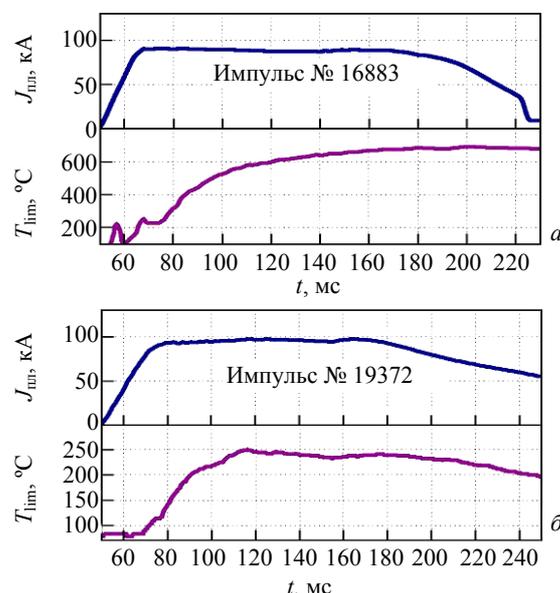


Рис. 13. Поведение тока  $J_{\text{пл}}$  и температуры поверхности лимитера  $T_{\text{lim}}$  с тонким КПС-слоем в ходе разряда для случаев: а — отсутствия теплового контакта Li—Мо ( $T_{\text{max}} \approx 650$  °С); б — для случая его восстановления ( $T_{\text{max}} \approx 200$  °С) [17]

В реальных условиях Т-11М тепловой поток на лимитер не оставался постоянным во времени [23]. В начальной фазе разряда его плотность могла достигать 15—20 МВт/м<sup>2</sup>, снижаясь затем до 5 МВт/м<sup>2</sup>, видимо, за счет увеличения в ходе разряда доли излучательных потерь. В результате температура  $T_{\text{lim}}(t)$ , достигнув некоторого уровня, оставалась почти неизменной до спада тока (см., например, рис. 13, б).

Иногда подобное квазистационарное состояние одновременно устанавливалось и по другим плазменным параметрам: по плотности, температуре и эффективному заряду.

На рис. 14 [18] представлен один из таких случаев. Факт существования квазистационарного состояния, превышающего по времени 5 энергетических времен жизни плазмы (около 5 мс), говорит о достижении баланса между потоками частиц со стенки (лимитера) и из плазмы.

Кроме того, длительное существование  $Z_{эф}(0)$  на примерно постоянном уровне, близком к 1, говорит в пользу того, что литий не собирается, как опасались, к центру, а локализуется вблизи границы, подобно тому, как это происходило на TFTR [21]. Механизм подобной экранировки неясен. На рис. 15 [18] приведено распределение излучательных потерь по малому радиусу шнура.

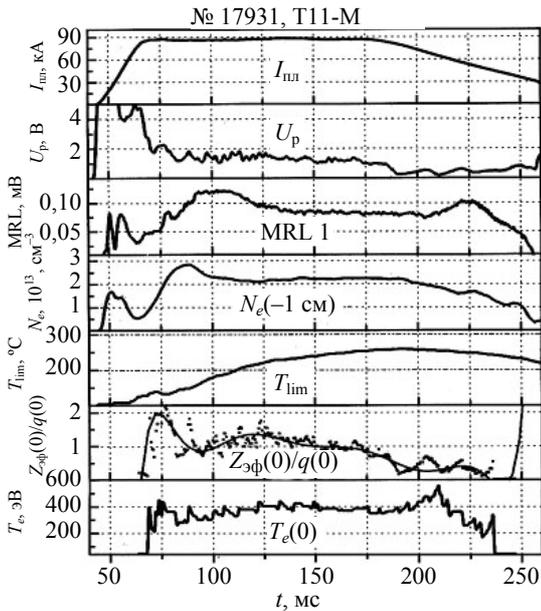


Рис. 14. Квазистационарное состояние разряда Т-11М с «тонким» КПС-лимитером [18]: ток плазмы  $J_{пл}$ ; напряжение на обходе тора  $U_p$ ; сигнал MRL, пропорциональный полной мощности излучательных потерь; средняя плотность плазмы  $N_e$ ; температура диафрагмы  $T_{lim}$ ; эффективный заряд плазмы  $Z_{эф}(0)$  (деленный на запас устойчивости в центре шнура  $q(0) \approx 1$ ); электронная температура в центре  $T_e(0)$

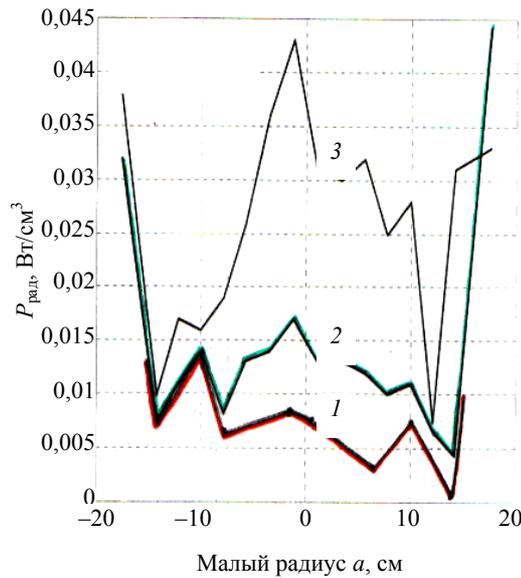


Рис. 15. Пространственная зависимость излучательных потерь для экспериментов с графитовым и литиевым лимитерами [18]: 1 — литиевый лимитер, квазистационарная фаза разряда; 2 — начальная фаза; 3 — С-лимитер

Легко видеть, что они локализованы вблизи границы шнура и степень их локализации растет в процессе разряда.

Приведенное там же распределение излучательных потерь для случая графитового лимитера обнаруживает значительный пик в центре, что, очевидно, коррелирует с наблюдаемым в этом случае ростом  $Z_{эф}(0)$  до уровня 1,4—1,6.

## ПРОБЛЕМА ЗАХВАТА ТРИТИЯ ЖИДКИМ ЛИТИЕМ И ЕГО ОБРАТНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ

Одним из ожидаемых последствий введения лития в плазму токамаков оказалась резко возросшая сорбция ионов  $D^+$  и  $H^+$  на стенках разрядной камеры, частично покрытых литием (TFTR, T-11M, CDXU [25]). Кроме того, на T-11M была обнаружена еще и сорбция ионов  $He^+$  [10, 15] с медленной десорбцией на протяжении

20—100 с после разряда. Чтобы полностью устранить сорбцию гелия, оказалось достаточным прогреть стенки камеры Т-11М до 50—100 °С. Попытка провести аналогичную десорбцию дейтерия со стенок камеры, покрытых литием, прогревая их до максимально возможных 250 °С, оказалась безрезультатной. Однако Li-лимитер в отличие от стенок допускал прогрев до 450 °С. Такой прогрев был проведен после завершения экспериментов.

На рис. 16 [10, 15] показан ход давления дейтерия в разрядной камере Т-11М как функция температуры лимитера. Легко видеть, что захваченный дейтерий на-

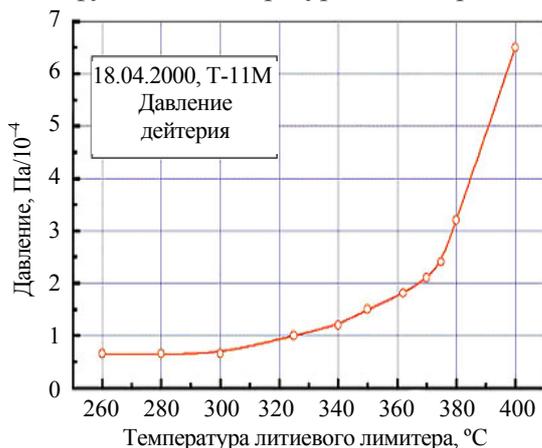


Рис. 16. Зависимость потока дейтерия из литиевого лимитера при его прогреве после окончания работы [10, 15]

чинает выходить из лития при прогреве выше 320 °С. Распад гидридов лития можно было ожидать при температуре масштаба 600° С и выше. Отсюда следует вывод, что значительная часть дейтерия связывалась не в виде дейтерида лития, а существенно слабее, в виде раствора в литии. Для его извлечения оказался достаточен прогрев выше 370—400 °С.

Лабораторные эксперименты, проведенные в США [26] и Японии [27], показали, что литий может быть полностью освобожден от внедренных ионов дейтерия путем прогрева до 500 °С.

### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ТОКАМАКА-РЕАКТОРА С ПЕРВОЙ СТЕНКОЙ И ДИВЕРТОРОМ НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

В силу изложенного литий представляется на сегодняшний день наиболее перспективным жидким металлом, который может использоваться для защиты первой стенки и диверторных пластин токамака-реактора. Результаты экспериментов с Ga остаются интересны с точки зрения техники создания капельных лимитеров, предназначенных для инъекции лития в периферийную плазму, если потребуются ее дополнительное локальное охлаждение. К достоинствам литиевых КПС следует отнести также их высокую стойкость по отношению к импульсным тепловым нагрузкам, развивающимся в срывах. Как показали стендовые испытания, моделирующие такие нагрузки [10], только 1—5% падающего потока тепла достигает поверхности КПС, экранируясь слоем испаренного лития.

На рис. 5 была показана принципиальная схема литиевого токамака с первой стенкой на основе КПС. Как следует из рис. 9, поверхность лития, обращенная к плазме, должна была бы иметь рабочую температуру в диапазоне 350—500 °С, чтобы между нагревом поверхности и локальным охлаждением плазмы сохранялась отрицательная обратная связь. Потери лития должны восполняться его свободно текущим потоком с внутренней стороны КПС. Диверторные пластины в таком варианте должны играть роль коллектора лития, вытекающего из плазменного шнура.

Напомним, что в диапазоне температур 200—350 °С литий активно захватывает ионы  $D^+$  и  $T^+$ , но уже не связывает He. Если создать в диверторе такую относительно низкотемпературную зону, становится возможным их разделение с последующей откачкой и удалением гелия. Дальнейшая очистка от дейтерия и трития может быть осуществлена прогревом лития до температуры 400—500° С (см. рис. 15). Очищенный литий возвращается в итоге во внутренний литиевый контур (см. рис. 5).

Очевидно, что реализация такой схемы должна обеспечиваться эффективной системой охлаждения. При охлаждении лития возникают трудности с теплоносителем. Идеальным теплоносителем был бы жидкий литий. Однако пока не созданы надежные изоляционные покрытия, позволяющие прокачивать его поперек магнитного поля. Это заставляет искать другие теплоносители. Например, одним из них могла бы стать дифенильная смесь с температурой затвердевания 12,3 °С [10].

Применение воды в качестве теплоносителя потребует двухконтурной схемы охлаждения. Это снижает ее эффективность, что может оказаться критичным для диверторной области. Актуальным при этом становится вопрос о перераспределении основного теплового потока с дивертора на первую стенку.

Такое перераспределение, как указывалось, в принципе возможно. Управляя временем жизни ионов в периферийной области шнура, можно установить режим «некоронального» излучения лития, при котором основная часть теплового потока из плазмы (масштаба 0,2—0,3 МВт/м<sup>2</sup>) будет переизлучаться на первую стенку [10, 16, 17]. В экспериментах на Т-11М удавалось переизлучать до 80% полного теплового потока.

Однако плотность излучаемой энергии была на порядок ниже той, которая предполагается в реакторе. Для моделирования этого явления в будущем необходимы токамаки, на порядок превосходящие Т-11М по мощности нагрева плазмы и, соответственно, по уровню тепловых потерь.

Одно из возможных конструктивных решений для первой стенки с двухконтурной системой водяного охлаждения приведено в качестве примера на рис. 17, представляющем собой увеличенный фрагмент (кольцо) рис. 5 [10]. Основой конструкции является двойной стальной или ванадиевый сильфон. Зазор между его стенками размером 0,1—0,5 мм заполнен гелием при давлении 1—2 атм. Толщина обращенной к плазме КПС составляет 2—5 мм, толщина стенки сильфонов 1—2 мм. Литиевый канал, расположенный в гофрах сильфона, поддерживает постоянное заполнение КПС литием. При температуре поверхности КПС 450 С° и охлаждающей воды 200 °С поток тепла через такую стенку может составлять 0,4 МВт/м<sup>2</sup>. Важное преимущество двойного сильфона состоит в том, что прокачка гелия, находящегося в зазоре между сильфонами, может быть использована для удаления трития в случае его диффузии через первую стенку. Заполнение зазора галлием

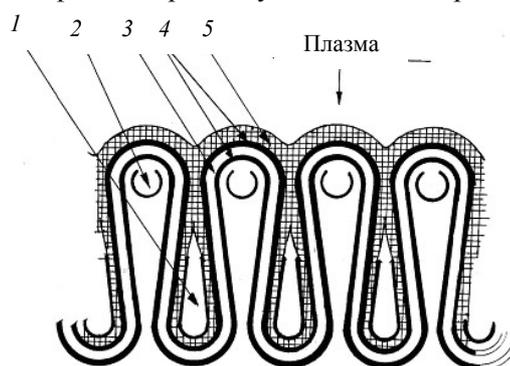


Рис. 17. Примерная схема построения первой стенки реактора-токамака с тонкой литиевой КПС [10] и двухконтурной системой водяного охлаждения: 1 — каналы подачи очищенного лития; 2 — трубы водяного охлаждения; 3 — слой гелия либо галлия, разделяющий литиевый контур и контур водяного охлаждения; 4 — двойной стальной сильфон; 5 — литиевые КПС, глядящие в плазму

может существенно увеличить тепловой поток, удаляемый через такую стенку, вплоть до  $2 \text{ МВт/м}^2$ . В этом случае она могла бы играть роль диверторной пластины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно видеть, что применение жидких металлов в токамаке не вызывает каких-либо непреодолимых физических или технических трудностей.

Успешный опыт эксплуатации капельного лимитера демонстрирует возможность ввода быстро движущегося потока жидкого металла в камеру токамака в процессе разряда, что может быть использовано для решения задач теплосъема или охлаждения периферии шнура.

Положительный опыт использования лития в качестве наполнителя КПС создает предпосылки для разработки проекта литиевого токамака-реактора типа DEMO. В литиевом токамаке в отличие от графитового или бериллиевого отчетливо видна принципиальная возможность решения таких ключевых проблем DEMO, как рекуперация трития и дейтерия, устранение проблемы пыли, селективная откачка гелия, защита первой стенки от элмов и срывов.

Очевидно, что, как и в случае с ИТЭР, созданию проекта подобного реактора должна предшествовать практическая проверка основных технических решений на больших токамаках. Мы полагаем, что эксперименты с жидкими металлами на Т-11М и Т-3М могут служить исходными пунктами для разработки этих программ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ЛИТИЕВЫЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ СИСТЕМЫ [10]

Идея использования литиевых капиллярно-пористых систем для защиты приемных элементов диверторных пластин [7—10] исходит из того, что наиболее эффективным механизмом снижения локальных тепловых нагрузок является переизлучение энергии на примесях, в нашем случае — на литии. При этом если в ИТЭР рассматривается метод добавления в диверторный объем тяжелых газов для создания излучающей плазменной мишени, то в литиевом токамаке такая мишень должна формироваться более естественным образом — путем поступления в плазму большего или меньшего количества лития в зависимости от величины теплового потока, поступающего в дивертор или на первую стенку реактора. Тем самым энергетический поток из плазмы перераспределяется на большую поверхность и плотность ее поступления на приемные поверхности дивертора снижается. В итоге вывод энергии из дивертора производится в менее напряженных условиях за счет теплопередачи к контурам охлаждения и далее в системы преобразования энергии.

Подвод жидкого металла к поверхности, контактирующей с плазмой, происходит через капиллярно-пористую систему (см. рис. 4). Ее характеристики (переменная пористость, анизотропия проницаемости, геометрия рабочей поверхности и др.) могут регулироваться в широких пределах путем изменения технологии изготовления КПС. Конструкция КПС должна обеспечить достаточное давление рабочего тела в системе подпитки за счет сил капиллярного напора. Такая система является самоудерживаемой

и саморегулируемой, поскольку распределение давления рабочего тела в КПС быстро реагирует на локальные изменения тепловой нагрузки на ее поверхность. Этот принцип реализуется и хорошо практически освоен при создании тепловых труб.

Литий активно взаимодействует с водородом и его изотопами. Гелий и другие инертные газы в обычных условиях с литием не взаимодействуют. Используя это свойство, можно осуществлять сепарацию газов, отделяя изотопы водорода от гелия и удаляя его через систему откачки.

Длительная работа контактных элементов на базе КПС обеспечена их следующими свойствами:

— эрозия контактной поверхности компенсируется благодаря постоянной подпитке жидким литием;

— возникающие в заполненной жидким металлом КПС термические градиенты не могут создавать напряжений. Как следствие этого в контактных пластинах должны отсутствовать усталостные трещины, что неизбежно для твердотельных пластин;

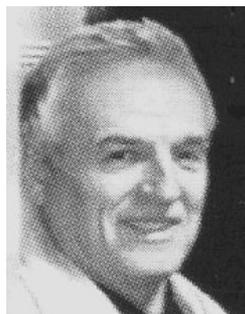
— отсутствует проблема разработки технологии формирования и соединения капиллярно-пористой системы с несущей конструкцией дивертора и стенки, являющаяся проблемным вопросом для твердотельного варианта;

— накопление трития в контактных поверхностях можно контролировать, поддерживая его концентрацию на необходимом уровне в слабо циркулирующем жидком литии, путем его локального прогрева, как было показано экспериментально, до температуры 450—500 °С;

— литиевый пар в отличие от обычного газа эффективно конденсируется на металлических поверхностях. Возможно, благодаря этому эффекту диагностические окна токамаков (TFTR, T-11M) запылялись литием незначительно.



Сергей Васильевич Мирнов, начальник ОЭФТ ОФТР ТРИНИТИ, доктор ф.-м.н.



Владимир Алексеевич Евтихин, начальник отдела ФГУП «Красная Звезда», кандидат т.н.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kulcinski G.L.** First wall protection schemes for inertial confinement fusion reactors. — J. Nucl. Mater., 1979, vol. 85—86, p. 87—97.
2. **Муравьев Е.В.** Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 1980, вып. 2(6), с. 57.
3. **UWMAK-I.** A Wisconsin Toroidal Fusion Reactor Design Study. — In: UWFDM-68. University of Wisconsin, 1974.
4. **Воронков О.Г., Зубарев В.Ф.** — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Синтез, 1985, вып. 3, с. 45—52.
5. **Водяник В.О., Демьяненко В.Н., Колесниченко А.Ф., Мирнов С.В., Муравьев Е.В.** Жидкометаллический лимитер токамака. Первые результаты. — Физика плазмы, 1988, вып. 14, с. 628—632.

6. **Mirnov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V.** Liquid-metal tokamak divertors. — *J. Nucl. Mater.*, 1992, vol. 196—198, p. 45—49.
7. **Evtikhin V.A., Golubchikov L.G.** Divertor of fusion reactor. RF Patent № 2051430, Feb. 7, 1995.
8. **Golubchikov L.G., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Pistunovich V.I., Potapov I.N., Chumanov A.N.** Development of the liquid metal fusion reactor divertor with capillary structure of the target. — *J. Nucl. Mater.*, 1996, vol. 233—237, p. 667—672.
9. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Pistunovich V.I., Golubchikov L.G., Korzhavin V.M., Pozharov V.A., Prokhorov D.Yu.** The liquid lithium fusion reactor. — *Proc. 16th Intern. Conf. on Fusion Energy*. Montreal, 7—11 Oct. 1996; *Fusion Energy*, 1997; IAEA, Vienna, 1997, vol. 3, p. 659—665.
10. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** — *Plasma Phys. and Contr. Fus.*, 2002, vol. 44, p. 955.
11. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Shpolyanski V.N., Yezhov N.I., Afanasiev N.M., Chumanov A.N., Khripunov B.I., Petrov V.B., Shapkin V.V., Prokhorov D.Yu., Zhogolev V.E., Belan V.G., Konkashbaev I.K., Mirnov S.V., Nikandrov L.B., Lopatkin A.V., Muratov V.G., Sokolov Yu.A., Korzhavin V.M., Golubchikov L.G.** Design, calculation and experimental studies for liquid metal system main parameters in support of the liquid lithium fusion reactor. — *Proc. 17th Intern. Conf. on Fusion Energy*. Yokohama, Japan, 19—24 Oct. 1998; *Fusion Energy*; 1998; IAEA, Vienna, 1999, IAEA-CSP-1/P, vol. 4, p. 1309—1312.
12. **Lazarev V.B., Azizov E.A., Mirnov S.V., Alekseyev A., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V.** Compatibility of the lithium capillary limiter with plasma in T-11M. — In: *26th EPS Conf. on Contr. Fusion Plasma Physics*, ECA. 1999, vol. 231, p. 845—848.
13. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Azizov E.A., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Sotnikov S.M.** Experimental study on tokamak plasma interaction with lithium capillary-pore systems. In: *18th IAEA Fusion Energy Conf. Book of abstracts*. Sorrento, Italy, 4—10 Oct. 2000, IAEA-CN-77/FTP1/24, p. 47.
14. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** Energy removal and MHD performance of lithium capillary-pore system for divertor target application. — *Fus. Eng. Design*, 2000, vol. 49—50, p. 195—200.
15. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** — *Fus. Eng. Design*, 2001, vol. 56—57, p. 39.
16. **Mirnov S.V., Lazarev V.B., Evtikhin V.A. et al.** — *Fus. Eng. Design*, 2003, vol. 65, p. 455.
17. **Lazarev V.B., Azizov E.A., Alekseev A.G. et al.** — In: *30th EPS Conf. on Contr. Fus. and Plasma Phys.* S. Petersburg, 7—11 July 2003, ECA, vol. 27, A P-3.162.
18. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** — *Plasma Sci. and Techn.* 2004, vol. 6, № 3, p. 2291.
19. **Kolesnichenko A.F.** Technological MHD Installations and Processes. — Kiev: Naukova Dumka, 1980.
20. **Skinner C.H. et al.** Plasma wall interaction and tritium retention in TFTR. — *J. Nucl. Mater.*, 1997, vol. 241—243, p. 214—226.
21. **Mansfield D.K.** Overview of TFTR Li experiments. — In: SNL, Albuquerque NM, Nov. 13—17, 2000.
22. **Hogan J.T., Bush C.E., Skinner C.H.** Lithium effects in plasmas. — *Nucl. Fusion*, 1997, vol. 37, p. 705—711.
23. **Лазарев В.Б., Алексеев А.Г., Белов А.М., Мирнов С.В.** — *Физика плазмы*, 2002, т. 28, с. 1.
24. **Allain J.P., Ruzic D.N., Hendricks M.R.** Measurements and modeling of D, He and Li sputtering of liquid lithium. — *J. Nucl. Mater.*, 2001, vol. 290—293, p. 180—184.
25. **Majeski R., Doerner R., Kaita R., Antar G., Timberlake J. et al.** Liquid lithium experiments in CDX-U. — In: *18th IAEA Fusion Energy Conf. Book of abstracts*. Sorrento, Italy, 4—10 Oct. 2000, IAEA-CN-77/FTP1/21, p. 102.
26. **Baldwin M.J., Doerner R.P., Causey R., Luckhardt S.C., Conn R.W.** — *Rep. NCP1 25. 43 Annual Meeting of APS*, 2001, Div. of Plasma Phys.
27. **Furuyama Y., Ito K., Dohi S. et al.** — *J. Nucl. Mater.*, 2003, vol. 313—316, p. 288.

Статья поступила в редакцию 2 августа 2005 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, вып. 4, с. 3—18.