

УДК 533.9.07

КОНЦЕПЦИЯ ЗАМКНУТОГО ЛИТИЕВОГО ЦИКЛА В УСТАНОВКЕ ДЕМО-ТИН С СЕКЦИОНИРОВАННЫМ ДИВЕРТОРОМ

В.Ю. Сергеев¹, В.Г. Скоков², Б.В. Кутеев^{2,3}, В.М. Тимохин¹¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Организация взаимодействия плазма—стенка остаётся актуальной задачей при длительной работе токамака с интенсивной реакцией термоядерного синтеза. Предложены концепция литиевого цикла и конструкция секционированного дивертора для токамака ДЕМО-ТИН. Сделаны оценки параметров и сформулированы требования к компонентам литиевого цикла. Выбраны технические решения для скорости потока в литиевом цикле ≈ 10 г/с. Оценена толщина 0,1 мкм жидкого литиевого слоя на поверхности первой стенки для защиты твердотельных покрытий первой стенки. На основе простой модели показано, что при температуре стенок 200—300 °C толщина 0,1 мкм может достигаться за ≈ 1 мин. За 3—4 ч плёнка может достигнуть квазистационарных значений 13—15 мкм. При температуре выше 340 °C плёнка не формируется из-за роста термического испарения лития. Температура стенок 700 °C секции дивертора с литиевым бассейном выбрана такой, чтобы формирование дейтерида и тритида лития в нём не происходило. Образование дейтерида и тритида лития возможно в жидкометаллическом литиевом защитном слое стенки при температуре менее 300 °C. Для существенного снижения взрывопожарной опасности при работе с горячим жидким литием предлагается увеличить в 2—3 раза размер диверторной секции с литиевым бассейном ДЕМО-ТИН, что может позволить перейти от водяного к гелиевому теплоносителю.

Ключевые слова: ДЕМО-ТИН, дивертор, первая стенка, тепловые нагрузки, литиевые технологии.

THE CLOSED LITHIUM LOOP CONCEPT FOR DEMO-TIN TOKAMAK WITH SECTIONED DIVERTOR

V.Yu. Sergeev¹, V.G. Skokov², B.V. Kuteev^{2,3}, V.M. Timokhin¹¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia³National Research Nuclear University «MEPHI», Moscow, Russia

The organization of plasma—wall interaction is still an urgent task for a long-term operation of a tokamak with an intense thermonuclear fusion reaction. The concept of a lithium cycle and the design of a sectioned divertor for the DEMO-FNS tokamak are proposed. The basic parameters have been estimated and the requirements for lithium cycle components have been stated. Technical solutions have been selected for the flow rate in the lithium cycle of ≈ 10 g/s. A liquid lithium layer thickness of 0.1 μm on the first wall surface have been estimated to protect the solid tiles of the first wall. A simple model shows that at a wall temperature of 200—300 °C, a thickness of 0.1 μm can be achieved in ≈ 1 minute. In 3—4 hours the film can reach quasi-stationary values of 13—15 μm . At temperatures above 340 °C, the film does not appear due to increased thermal evaporation of lithium. The wall temperature of 700 °C in the divertor section with the lithium pool was chosen to prevent the formation of lithium deuteride and tritide in it. The formation of lithium deuteride and tritide is possible in the liquid lithium protective layer on the wall at temperatures below 300 °C. To reduce significantly the fire and explosion hazard of the DEMO-FNS divertor filled by hot liquid lithium, it is proposed to increase the size of the section with the lithium pool by 2—3 times, which may allow the application of helium coolant instead of water.

Key words: DEMO-FNS, divertor, first wall, heat loads, lithium technologies.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-29-40

ВВЕДЕНИЕ

По мере приближения параметров термоядерных установок к реакторным задача поиска и создания условий для длительной работы токамака с интенсивной реакцией синтеза становится всё более важной. Взаимодействие плазма—стенка в токамаке-реакторе ИТЭР ILW (ITER Like Wall) реализуется с использованием покрытия обращённых к плазме компонентов (первой стенки и диверторных пластин) защитными металлическими плитками (тайлами). Основными проблемами при отводе тепловых и плазменных нагрузок в области диверторного слоя SOL являются необходимость организации частичного или полного «отрыва» диверторных пластин от потоков основной плазмы, борьба с загрязнениями поверхности тайлов примесями, включая захват радиоактивного трития, изменение характеристик кристаллической решётки конструкционных материалов под действием нейтронного флюенса, приводящее к изменению химическо-

го состава покрытий, а также снижению требуемых прочностных и теплофизических характеристик материалов тайлов. Одним из вариантов решения указанных проблем является использование жидкого лития в диверторе и в качестве покрытия тайлов первой стенки. Низкий заряд ионов Li и то, что теплофизические свойства жидкого лития слабо чувствительны к флюенсу нейтронов, обуславливает привлекательность его применения в источниках нейтронов, гибридных системах синтез—деление и термоядерных реакторах.

Различные литиевые технологии развивались для управления разрядом и оптимизации взаимодействия плазмы с компонентами первой стенки на токамаках T-10 [1, 2], T-11 [3], NSTX [4], FTU [5], DIII-D [6], TFTR [7] и др. Наиболее широкий спектр методов опробовался на установке EAST. Он включал создание покрытия стенок литием за счёт его испарения в вакуумной камере перед плазменным разрядом [8], инжекцию лития в виде потоков пыли [9] и последовательностей макрочастиц [10] во время разряда, установку разных вариантов литиевого лимитера с открытой поверхностью [11]. Цели проводимых экспериментов на разных установках включали снижение рециклинга водорода и подавление выхода примесей со стенки [1, 2, 4—8, 11], организацию циркуляции потоков лития в пристеночной и основной плазме с помощью эмиттеров и коллекторов [2, 3], подавление или смягчение последствий периферийных локальных мод ELMs (Edge Localized Modes) [9—11].

Одним из перспективных, с точки зрения авторов, направлений для реализации стационарного разряда токамака является использование концепции закрытого секционированного литиевого дивертора. Его варианты были предложены для токамака-реактора DEMO в двух различных подходах приёма потоков тепла и плазмы SOL — с испаряющей [12] и с конденсирующей [13] внутренними стенками секций. В первом варианте температура стенок секций дивертора поддерживается на высоком уровне до ≤ 1200 К. Создание плотных паров лития обеспечивает рассеяние энергии плазмы SOL по внутренней поверхности секций дивертора. Во втором варианте температура внутренней охлаждаемой поверхности стенок секций поддерживается близкой к температуре плавления лития 180°C , а энергия плазмы SOL снимается за счёт интенсивного испарения лития в точке удара. В работе [14] была предложена комбинация обоих подходов, схематично описана конструкция и сделаны оценки параметров такого дивертора для проекта термоядерного источника нейтронов DEMO-ТИН [15].

В данной статье, развивающей концепцию секционированного литиевого дивертора [14], описан на уровне технических предложений стационарный замкнутый цикл циркуляции лития во внешнем диверторе и на первой стенке установки DEMO-ТИН.

КОМПОНЕНТЫ ЛИТИЕВОГО ЦИКЛА В ДЕМО-ТИН

Токамак DEMO-ТИН и его дивертор. Основные параметры проектируемого токамака-источника нейтронов DEMO-ТИН следующие [15]: большой радиус $R = 3,2$ м, малый радиус $a = 1$ м, ток по плазме $I_p = 5$ МА, тороидальное поле $B_t = 5$ Тл, электронная плотность на магнитной оси $n_e(0) = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, центральная электронная температура $T_e(0) = 10$ кэВ, мощность дополнительного нагрева РЕС + РНБИ = 36 МВт, мощность синтеза $P_{\text{fus}} = 40$ МВт. Предполагается, что

будет реализована однонулевая магнитная конфигурация с нижним дивертором. Она не только упростит систему управления разрядом, но и позволит избежать реализации технически сложного верхнего литиевого дивертора.

На рис. 1 показан принцип работы внешнего закрытого секционированного литиевого дивертора DEMO-ТИН [14]. Энергия и частицы из области SOL поступают в дивертор вдоль сепаратрисы 1 и попадают в наиболее удалённую от X-точки секцию, называемую испарительной и обозначенную цифрой I. Температура выполненных из нержавеющей стали стенок здесь поддерживается на достаточно высоком уровне $\approx 700^\circ\text{C}$. Согласно

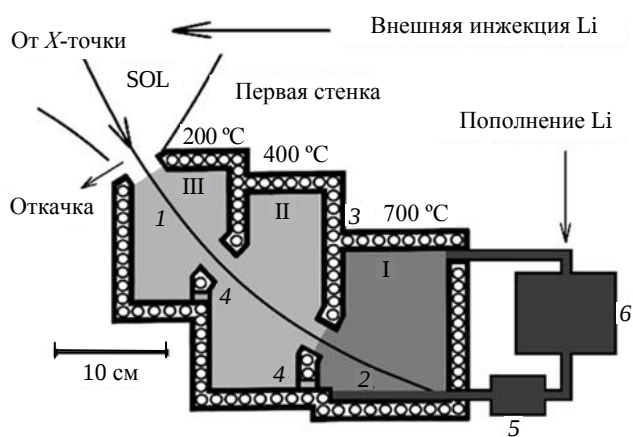


Рис. 1. Схема компонентов системы литиевого цикла в поперечной плоскости установки DEMO-ТИН

[16] экспериментально показана стойкость к литью нержавеющей стали на протяжении до 1500 ч при температуре 500—800 °С. Оценка химической стойкости материала дивертора в потоке движущегося лития требует дополнительных исследований. Предполагается, что режим температуры стенок в этой и других секциях будет поддерживаться системой охлаждения дивертора при заданном потоке тепла плазмы SOL, идущем в дивертор. Входящая в систему из SOL энергия снимается за счёт взаимодействия с парами лития, формирующимися за счёт высокой температуры стенок и испарения лития из бассейна 2.

Стенки двух других секций, обозначенных цифрами II и III, поддерживаются при более низкой температуре ≈ 400 °С и ≈ 200 °С с помощью системы охлаждения 3. В текущем концептуальном проекте детали системы охлаждения не рассмотрены, так как для этого требуется детальная инженерная прорисовка конструкции дивертора. Обоснование выбора температур внутренних поверхностей секций II и III для снижения тепловой нагрузки на них и минимизации выхода потока лития из дивертора в направлении плазмы SOL приведено в [14]. На стенках секций происходит конденсация паров лития, выходящих из испарительной камеры I, после чего жидкий металл стекает в бассейн через отверстия для стока 4. Последовательность секций таким образом выполняет роль системы дифференциальной откачки. Малая ширина щели 5 см, связывающей секционированный дивертор с основным объёмом вакуумной камеры токамака, дополнительно снижает поток лития из дивертора в SOL.

Прямое разбрызгивание лития из бассейна в области «точки удара» может представлять опасность. Вылетевшая оттуда крупная капля лития может попасть в область X-точки и вызвать срыв разряда. Во избежание этого предлагается сформировать магнитную диверторную конфигурацию так, чтобы сепаратриса была изогнута, как показано на рис. 1.

Периферийные устройства литиевого контура расположены снаружи установки. Они включают насос для перекачки жидкого лития 5, а также систему очистки лития от примесей 6. Для компенсации потерь лития в системе очистки и в системе откачки предусмотрены каналы пополнения чистым литием секции I дивертора и внешняя инжекция лития в виде макрочастиц, жидкометаллических и/или пылевых струй. Отметим, что внешняя инжекция литиевой пыли или литиевых гранул может быть полезна для подавления или смягчения опасных ELM Type I, как описано в работах [9—11]. С другой стороны, инжекция значительных потоков лития может приводить к срыву. На ряде установок была показана устойчивость разряда к значительным потокам лития в виде пыли: $\approx 5 \cdot 10^{21}$ ат./с для EAST [8], $\approx 2 \cdot 10^{22}$ ат./с для NSTX [17] и $\approx 10^{22}$ ат./с для T-10 [1]. Это определяет порядок максимально возможного инжектируемого потока лития для ДЕМО-ТИН $F_{\text{Li, inj, max}} = 2 \cdot 10^{22}$ ат./с. Расчёты с помощью кода B2SOLPS5.2 [18] показали, что периферийный поток литиевых атомов $8 \cdot 10^{22} \text{ с}^{-1}$ приводит к значениям $Z_{\text{эф}} \leq 2$ в центральной плазме. Поэтому при потоках лития $2 \cdot 10^{22} \text{ с}^{-1}$, обсуждаемых в данной статье, в центральной плазме значения $Z_{\text{эф}}$ окажутся меньше 2.

Защитный слой лития на первой стенке ДЕМО-ТИН. Предлагаемая концепция предполагает создание на первой стенке установки защитного литиевого покрытия. В соответствии с данными рис. 8 работы [19] при температурах около 300 °С смачиваемость литием конструкционных материалов характеризуется граничными углами 70—85°, достаточными для формирования литиевой плёнки. В ней собираются изотопы водорода и примеси. В жидком состоянии слой будет постепенно под действием силы тяжести стекать в дивертор. При стекании изотопы водорода и примеси поступают из бассейна дивертора в систему очистки. Так реализуется процесс литиизации — кондиционирование стенки (wall conditioning), широко используемый на установках T-10 [2], TFTR [7], EAST [8] и др. Для оценки толщины слоя лития, защищающего тайлы от частиц из плазмы, рассмотрим глубину их проникновения в жидкий литий. С использованием кода TRIM в версии SRIM-2013.00 рассчитывались потоки атомов водорода, трития, гелия и лития, падающие по нормали к поверхности защитного литиевого слоя. По современным представлениям основным физическим процессом, определяющим потоки частиц на стенку, является перезарядка с характерными значениями энергии 100—500 эВ [20]. Расчёты велись для максимально возможной энергии налетающих частиц ≈ 500 эВ. Глубина проникновения частиц в жидкое литиевое покрытие составила для водорода 79 нм, для трития 86 нм, для гелия 51 нм, для лития 36 нм. Таким образом, толщины слоя лития ≈ 100 нм будет достаточно для защиты первой стенки. Однако эта оценка является предварительной, поскольку надёжные экспериментальные и расчётные данные об энергиях частиц, бомбардирующих поверхность первой стенки, отсутствуют.

При оценке возможности формирования защитного слоя необходимо учитывать процессы, приводящие как к осаждению лития на стенке, так и к его потере. Из-за пределов вакуумной камеры в неё поступают следующие потоки лития: от внешней инжекции литиевой пыли F_{Li_inj} ; поток атомов лития, выходящий в SOL из щели секции III дивертора, $F_{Li_from_div}$ (см. рис. 1). В работе [14] для условий ДЕМО-ТИН были выполнены оценки, показывающие, что средний (с учётом неопределённостей параметров моделирования) поток лития из дивертора в SOL $F_{Li_from_div}$ составит $2 \cdot 10^{22}$ ат./с (соответствует $\approx 0,25$ г/с). Это значение близко к значению максимально возможного инжектируемого потока лития $F_{Li_inj_max}$.

В экспериментах по инжекции литиевой пыли в Т-10 [1] показано, что в основную плазму внутри последней замкнутой магнитной поверхности проникает примерно десятая часть лития, выходящего из инжектора. Аналогично в экспериментах с литиевой пылью на NSTX, по утверждениям авторов [17], только небольшая часть лития проникала внутрь сепаратрисы, хотя численных оценок сделано не было. В работе [21] были выполнены оценки, показывающие, что литиевые пылевые частицы, падающие под действием силы тяжести со скоростью 5 м/с, в условиях ИТЭР будут испаряться в плазме SOL. Потоки инжектированной в SOL литиевой пыли будут незначительно отличаться от потоков из дивертора. Для упрощения последующих оценок мы предполагаем, что часть $k_w = 0,9$ как инжектируемого потока F_{Li_inj} , так и потока, выходящего из дивертора, $F_{Li_from_div}$ может выходить на стенку и участвовать в формировании на ней защитного слоя лития.

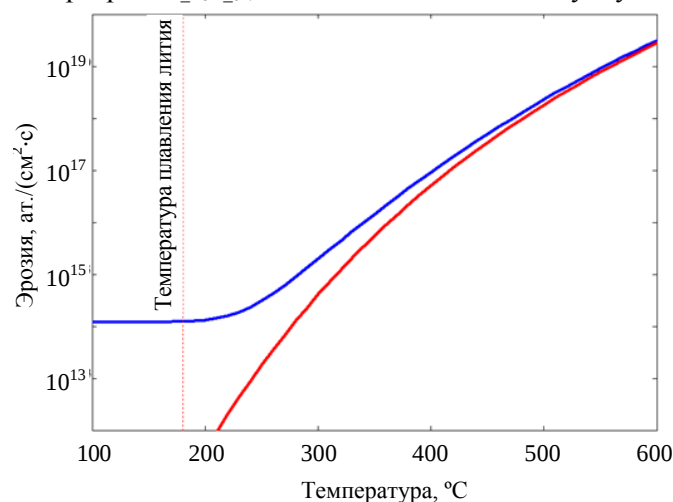


Рис. 2. Скорость эрозии лития, ожидаемая на первой стенке установки ДЕМО-ТИН [18]: — зависимость скорости испарения лития от температуры; — суммарная плотность потока эрозии лития под действием испарения и распыления дейтерием $\approx 7,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в экваториальной плоскости

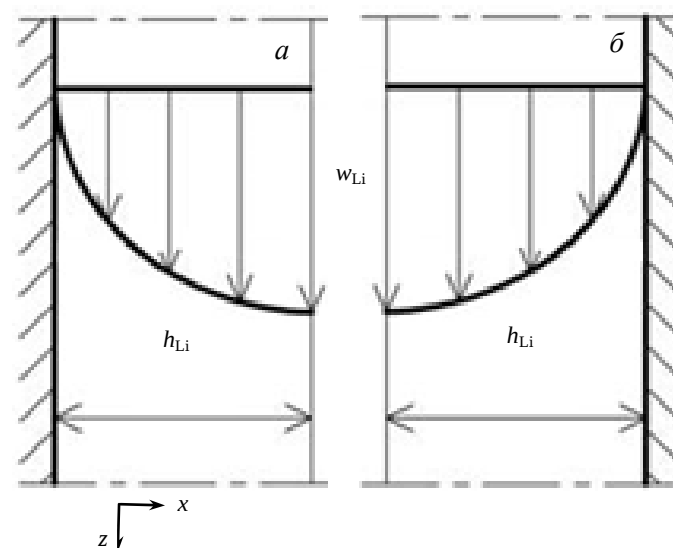


Рис. 3. Схема расчёта стекания лития по стенке (вертикальная линия со штриховкой) в районе экваториальной плоскости ДЕМО-ТИН со стороны сильного HFS (а) и слабого LFS (б) магнитных полей

Также предполагается, что выходящий из дивертора литий равномерно покрывает первую стенку. Данное предположение требует дальнейшей верификации с помощью двумерных кодов типа SOLPS-ITER, описывающих перераспределение лития в пристеночной плазме.

Для установления баланса роста плёнки лития на стенке необходимо учесть каналы его потерь — эрозию и стекание. Первый из них действует постоянно и описывается плотностью потока со стенки S_{Li_er} . Эрозия может происходить как за счёт физического распыления лития налетающими частицами, так и за счёт испарения, т.е. этот поток зависит от температуры стенки. На рис. 2 синей кривой показана зависимость от температуры плотности потока эрозии лития с единицы поверхности первой стенки $S_{Li_er}(T_w)$ в экваториальной плоскости установки ДЕМО-ТИН со стороны слабого магнитного поля под действием потока дейтерия $\approx 7,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с энергией ≈ 175 эВ на стенку согласно расчётам SOLPS5.2 [18].

По мере формирования слоя лития на поверхности стенки будет расти его масса. Сначала слой будет удерживаться на стенке за счёт сил поверхностного натяжения, затем литий начнёт стекать вниз под действием силы тяжести. Так формируется поток жидкого лития, стекающего со стенки в дивертор S_{Li_fl} . Скорость течения жидкости под действием силы тяжести зависит как от толщины плёнки, так и от вязкости жидкости. Вопрос расчёта стекания лития по внутренней поверхности вакуумной камеры токамака является сложной задачей [11]. Ограничимся оценкой для стекания слоя жидкого лития под действием силы тяжести, подходящей для области экваториальной плоскости токамака с большой вытянутостью плазмы. На рис. 3 показаны вертикальные стенки со стороны

сильного (*a*) и слабого (*b*) магнитного поля, по которым слой жидкого лития толщиной h_{Li} движется со скоростью w_{Li} в направлении оси z , совпадающей с направлением ускорения свободного падения g . Профиль скорости течения в зависимости от x , расстояния от стенки, пробегающего значения от 0 до h_{Li} показан жирной кривой.

Профиль скорости течения жидкого лития w_{Li} под действием силы тяжести будет определяться выражением, которое получается путём интегрирования одномерного уравнения Навье—Стокса [22, с. 446—448]:

$$w_{Li}(x, h_{Li}, T_w) = \frac{gx}{v(T_w)} \left(h_{Li} - \frac{x}{2} \right), \quad (1)$$

где v — кинематическая вязкость, зависящая от температуры поверхности стенки T_w . Для областей слабого (LFS) и сильного (HFS) тороидальных магнитных полей слой лития размером dx и тороидальной длиной $2\pi(R \pm a)$ переносит в направлении z за время dt массу лития:

$$dm_{Li_LFS} = \rho_{Li} w_{Li}(x) dt dx 2\pi(R + a), \quad dm_{Li_HFS} = \rho_{Li} w_{Li}(x) dt dx 2\pi(R - a),$$

где ρ_{Li} — плотность лития.

Складывая dm_{Li_omp} и dm_{Li_imp} и интегрируя по x от 0 до h_{Li} , можно определить полный поток атомов лития $S_{Li_fl}(h_{Li}, T_w)$, уходящих в направлении z , за счёт силы тяжести:

$$S_{Li_fl}(h_{Li}, T_w) = \frac{dM}{m_{Li} dt} = \frac{\rho_{Li} g h_{Li}^3 4R}{3m_{Li} v(T_w)}, \quad (2)$$

где $M = \int dm = \int_0^{h_{Li}} \rho_{Li} w_{Li} dt dx 2\pi 2R = 4\pi R \rho_{Li} dt \int_0^{h_{Li}} w dx = 4\pi R \rho_{Li} dt \frac{g}{v} \int_0^{h_{Li}} x \left(h_{Li} - \frac{x}{2} \right) dx = 4\pi R \rho_{Li} dt \frac{g}{v} \frac{h_{Li}^3}{3}$; m_{Li} — масса атома лития; $dm_{Li_LFS} + dm_{Li_HFS} = dm = \rho_{Li} w_{Li}(x) dt dx 2\pi R$.

Таким образом, для простейшего нульмерного анализа роста плёнки толщиной h_{Li} на первой стенке ДЕМО-ТИН площадью $A_w \cong 190 \text{ м}^2$ и с температурой T_w можно воспользоваться уравнением баланса процессов напыления, эрозии и стекания

$$\rho_{Li}(A_w/m_{Li}) dh_{Li}/dt = k_w(F_{Li_inj} + F_{Li_from_div}) - S_{Li_er}(T_w)A_w - S_{Li_fl}(h_{Li}, T_w). \quad (3)$$

Возьмём для оценок $F_{Li_inj} = F_{Li_from_div} = 10^{22}$ ат./с, $k_w = 0,9$. При температурах 200—300 °С вязкость лития варьируется в пределах 1,1—0,9 сантистокса [19].

На рис. 4 показана динамика нарастания литиевой плёнки в ДЕМО-ТИН при различных температурах стенки, полученная из решения уравнения (3). При толщине защитного слоя $h_{prot} = 0,1$ мкм максимальная скорость стекания лития у поверхности составит $\cong 10^{-4}$ мм/с, так что эффектом стекания на стадии нарастания слоя можно пренебречь. При $T_w = 200$ —300 °С нарастание происходит линейно со временем и слой толщиной $h_{prot} = 0,1$ мкм образуется за $t_{prot} \cong 1$ мин. Видно, что в дальнейшем при температуре 200—300 °С за 3—4 ч нарастает плёнка толщиной 13—15 мкм. После этого рост прекратится за счёт стекания лития в бассейн дивертора со скоростью 1—1,5 мм·с⁻¹. Примеси, захваченные литием, будут уноситься в дивертор и далее в систему очистки. При заданных падающих потоках формирование слоя лития при температуре $T_w \geq 340$ °С невозможно из-за того, что эрозия с поверхности будет превышать поток лития на стенку. Предполагается, что рабочая температура стенок $T \cong 300$ °С будет поддерживаться системой охлаждения стенок. Прототип системы охлаждения и её испытания на стенде ЦЕФЕЙ описаны в работе [18]. Необходимо отметить, что приведённые здесь оценки потоков лития на первую стенку и роста литиевой плёнки на ней имеют предвари-

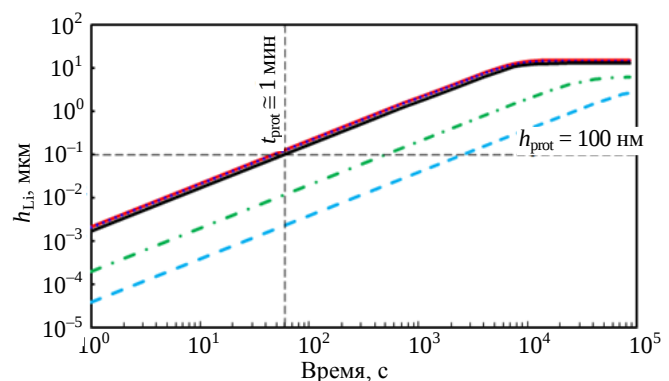


Рис. 4. Результаты расчёта динамики нарастания литиевой плёнки в ДЕМО-ТИН при различной температуре стенки T_w : — 200, — 250, — 300, — 336, — 338 °С

тельный характер. Стоит отметить, что согласно [11] из жидкометаллических литиевых покрытий могут под воздействием силы Ампера эжектироваться капли в направлении плазмы. Необходимы экспериментальные исследования, направленные на изучение динамики формирования, протекания и устойчивости таких жидкометаллических литиевых покрытий на первой стенке токамака.

Проблемы обеспечения работоспособности литиевых устройств в токамаке. Важной проблемой реализации технологии является захват литием трития. В системе (D_2 , T_2 —LiD, LiT—жидкий Li) с достаточно высокими температурами и давлениями, реализующимися в диверторе, доля гидрида зависит от давления рабочего газа над поверхностью и температуры жидкого лития [23]. При температуре 700 °C в испарительной камере I (см. рис. 1) дивертора ДЕМО-ТИН давление изотопов водорода в ней можно оценить как давление на сепаратрисе в точке стагнации ≈ 2 кПа [14, 18]. Это давление меньше равновесных давлений дейтерия ≈ 3 кПа и трития $\approx 3,6$ кПа, при превышении которых начинается образование дейтерида и тритида лития [23]. Значения, полученные с использованием равновесных параметров газов, следует воспринимать как оценки сверху. С учётом очистки и обновления лития в бассейне можно ожидать снижение скорости накопления гидридов лития. Без учёта циркуляции лития аналогичные экспериментальные исследования проводились при облучении жидкого лития дейтериевыми пучками [24] или плазменными сгустками [25].

С другой стороны, для условий первой стенки с ожидаемой температурой 200—250 °C образование LiD зависит от падающего на жидкий литий потока дейтерия, что экспериментально обнаружено при флюенсах 10^{21-22} D·см⁻² [24]. В работе [18] из расчётов по коду B2SOLPS5.2 для ДЕМО-ТИН сообщается значение потока дейтерия на стенку $\approx 10^{16}$ D·см⁻²·с⁻¹. Тогда для достижения указанных значений флюенса требуется 10^{5-6} с ≈ 1 —10 дней непрерывной работы. Таким образом, в обсуждаемой конструкции ДЕМО-ТИН образование гидридов лития на первой стенке возможно, что требует дальнейших исследований и верификации на действующем токамаке или на стендовых экспериментах. В будущих стендовых экспериментах, кроме создания циркуляции лития, необходимо увеличить продолжительность экспозиции (флюенса) облучения жидкого лития плазменными сгустками или пучками ионов дейтерия с целью выхода на

стационарные режимы, ожидаемые в секции I дивертора ДЕМО-ТИН (см. рис. 1).

Необходимо обратить внимание на тот факт, что чем меньше входная щель секционированного литиевого дивертора, тем меньший поток паров лития покидает его. В работе [14], как и в данной работе, была выбрана ширина щели 5 см. Именно ширина щели 5 см даёт оценку величины потока лития из дивертора $F_{Li_from_div} = 10^{22}$ ат./с, использованную для сделанного расчёта роста защитной литиевой плёнки на первой стенке. Такой размер был выбран из следующих соображений, основанных на экспериментальных результатах установки JET [26], наиболее близкой по параметрам к ДЕМО-ТИН. На рис. 5 показаны экспериментальные распределения тепловой нагрузки на внешней пластине дивертора установки JET [26]. На рис. 5, б видно, что ширина экспериментального теплового следа SOL во время квазистационарного разряда составляет ≤ 1 —2 см. Видно также, что система управления положением шнура во время квазистационарной стадии ограничивает эффективную область смещения

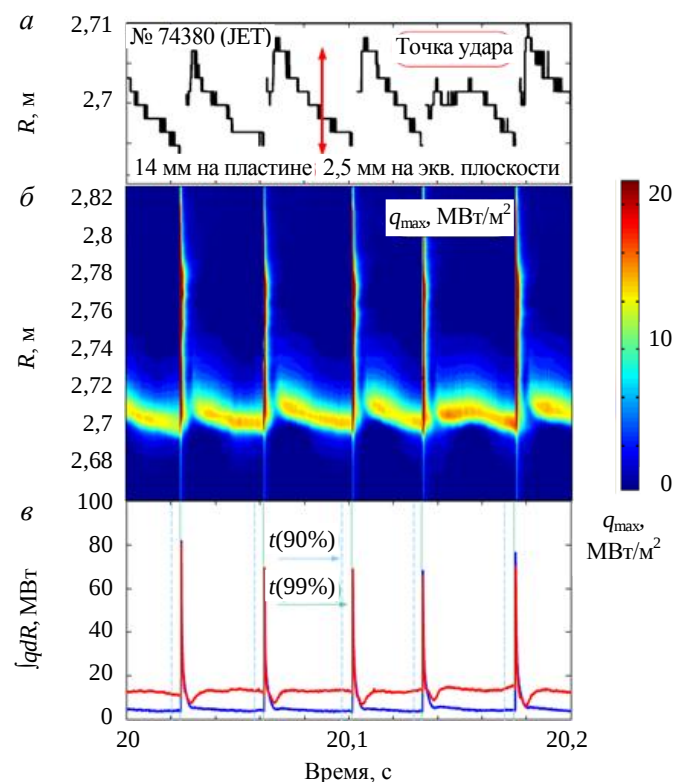


Рис. 5. Временная эволюция характеристик теплового потока SOL плазмы на внешней диверторной пластине токамака JET [26]: а — положение точки удара (strike line) по большому радиусу R; б — распределение по большому радиусу плотности теплового потока q ; в — изменение плотности теплового потока q и мощности $[qR]$

точки удара SOL в пределах $\leq 2\text{--}3$ см. Таким образом, при ширине щели 5 см в конструкции дивертора ДЕМО-ТИН, показанной на рис. 1, можно ожидать, что в рабочем режиме сепаратриса будет уверенно находиться внутри щелей с использованием системы катушек полоидального поля, управляющих магнитной конфигурацией.

Во время ELMs Type I на рис. 5 видно кратковременное уширение следа SOL до 10 см. Во избежание разрушения материала на входной секции III литиевого дивертора (см. рис. 1) необходимо защитить их с помощью выполненной из вольфрама капиллярно-пористой структуры (КПС), наполненной литием. В ряде работ, например, [5], продемонстрирована устойчивость КПС к кратковременным высоким нагрузкам за счёт интенсивного испарения лития с их поверхности и формирования в месте нагрузки облака испаренного вещества, поглощающего заметную долю падающей нагрузки. Следует также отметить, что растворимость вольфрама в литии при тех же температурах ещё ниже, чем для нержавеющей стали [16], что обеспечит устойчивость конструкции КПС.

Важным является вопрос удаления лития из вакуумной камеры при необходимости её вскрытия на атмосферу. Без специальных мероприятий такое вскрытие будет приводить к загрязнению лития разнообразными примесями, а его очистка, особенно при дистанционном обслуживании установки, весьма сложна [8, 27]. Из секционированного литиевого дивертора литий будет сливаться в контур очистки и перекачки, более подробно описанный далее. Из находящихся на стенке токамака при толщине слоя 15 мкм примерно 1,5 кг лития основная часть перед вскрытием установки стечёт в дивертор под действием силы тяжести, но для удаления остатков лития со стенки требуется разработка специальной технологии.

ПЕРИФЕРИЙНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЛИТИЕВОГО ЦИКЛА ДЕМО-ТИН

Блок-схема периферийных устройств литиевого дивертора. Очевидно, что потоки плазмы, идущие в дивертор, будут приносить туда не только рабочий газ, но и гелиевую золу, а также примесные газы установки и пылевые частицы компонентов первой стенки. Представляется, что литий, загрязнённый примесными газами и соединениями с ними, а также с пылевыми частицами, необходимо выводить из диверторного объёма и заменять очищенным литием.

Основные периферийные устройства для литиевого цикла показаны на рис. 6. Система 2 приспособлена для дистанционного обслуживания, для чего поток жидкого металла через обслуживаемую ветвь отсекается. Пройдя через 5, литий подаётся обратно в дивертор и систему 6. Обсуждаемые далее устройства обеспечения безопасности на рисунке не показаны.

Основные периферийные устройства для литиевого цикла показаны на рис. 6. Система 2 приспособлена для дистанционного обслуживания, для чего поток жидкого металла через обслуживаемую ветвь отсекается. Пройдя через 5, литий подаётся обратно в дивертор и систему 6. Обсуждаемые далее устройства обеспечения безопасности на рисунке не показаны.

Методики очистки и контроля лития. Основным параметром, определяющим функционирование периферийных устройств литиевого контура, — это циркулирующий через него поток лития. В работе [28] рассматривается токамак-реактор ДЕМО с 3 ГВт тепловой мощности и скоростью циркуляции лития 1 л/с для обеспечения непрерывной подачи трития в камеру реактора. Исходя из мощности ДЕМО-ТИН до 50 МВт, можно сделать оценку сверху 10 г/с требуемого циркулирующего потока лития.

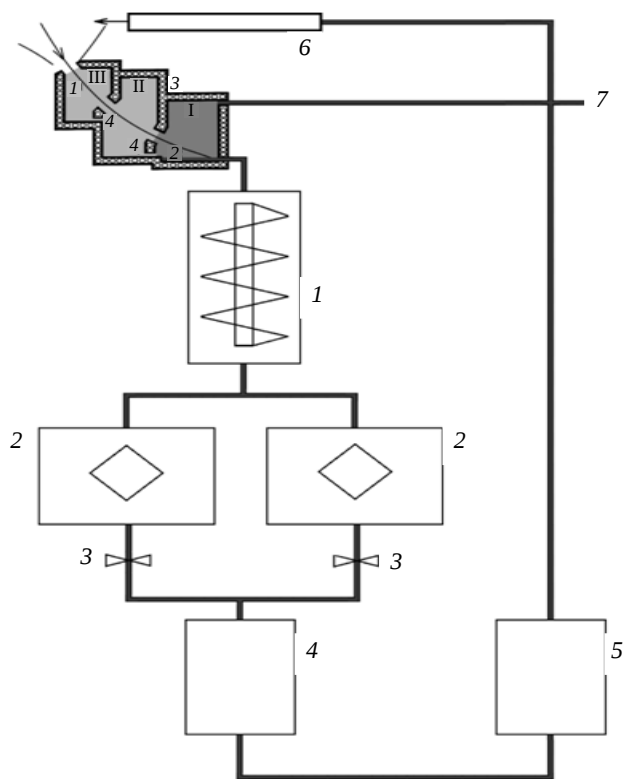


Рис. 6. Блок-схема периферийных устройств литиевого цикла ДЕМО-ТИН: 1 — шнековый насос для перекачки лития; 2 — блоки сменных фильтров (рабочий и запасной); 3 — система вентилей; 4 — потокомер; 5 — блок контроля качества очистки; 6 — система инъекции; 7 — патрубок пополнения чистым литием

При обсуждении систем очистки лития в литературе в основном делается упор на очистку от трития [28—30] во избежание загрязнения им оборудования литиевого цикла. Разработан целый ряд методик очистки, среди которых обсуждаются дистилляция [29, 31] и геттерирование иттрием, предложенные, например, для установки IFMIF [28].

Дистилляция является энергозатратным процессом, так как требует испарения лития, проходящего через дистилляционную колонну. Пример установки приведён в разделе 5.1.1.2 монографии [31]. В процессе дистилляции пары лития покидают испарительную камеру дистиллятора, выпадают в осадок в конденсационной камере и оттуда стекают в сборник очищенного лития. Газообразные изотопы водорода при этом отводятся в топливный цикл установки. Теплота испарения лития при температуре около 750 °С, гарантирующей разложение возможного осадка гидридов лития, составляет 21,5 МДж/кг. Однако определённые в эксперименте полные энергозатраты процесса, включая теплотери, оказываются примерно в 50 раз больше. Очевидно, что дистилляция всего объёма циркулирующего лития нецелесообразна, в первую очередь, с энергетической точки зрения.

В иттриевом геттере загрязнение лития примесями, в особенности азотом, снижает скорость очистки в геттере [32]. Обязательная очистка лития от азота с помощью горячих ловушек или титановых геттеров азота, функционирующих при температуре 600—800 °С [16, 31], потребует больших мощностей.

Установка ДЕМО-ТИН проектируется безуглеродной, поэтому очистку от углерода мы не считаем необходимой. Соединения кислорода так же, как и азота, будут очищаться методом фильтрации в системе, показанной на рис. 6, что следует из данных таблицы 5.2 работы [31]. Температура стенок 700 °С секции I дивертора (см. рис. 1), где расположен литиевый бассейн, выбрана так, чтобы формирование дейтерида и тритида лития в нём не происходило. Поэтому глубокая (до содержания примесей значительно ниже 0,1%) очистка от изотопов водорода в проекте литиевого цикла ДЕМО-ТИН не предполагается.

В работе [28] для токамака-реактора ДЕМО предлагается использовать только фильтрацию твёрдых примесей и холодную ловушку для очистки от растворённых в литии газов, в основном изотопов водорода. В конструкции предусмотрены блок фильтрации и холодная ловушка отдельными компонентами. Принцип работы холодной ловушки основан на эффекте значительного снижения растворимости изотопов водорода в литии при падении температуры: с 3% вес. при 700 °С в секции I дивертора до <0,1% при 200 °С в ловушке [33]. При снижении уровня растворимости примеси в литии выпадают в осадок и остаются в ловушке. Соединения примесей с литием осаждаются на элементах конструкции холодной ловушки: сетках в классическом варианте [31] или стенках сборки из концентрически вложенных друг в друга цилиндров [28]. Последний вариант был предложен для очистки больших потоков жидкого металла (~1 л/с).

В условиях ДЕМО-ТИН такое разделение видится излишним, и систему фильтрации и холодную ловушку предлагается объединить, подавая на вход горячий литий из дивертора и поддерживая фильтр при температуре, лишь немного превышающей температуру плавления лития. Помимо снижения на порядок содержания изотопов водорода в литии, фильтрация с использованием холодных ловушек позволяет также снизить в разы содержание примеси азота в литии [31, табл. 5.2 и 5.5; 16, раздел 2.3].

Для контроля засорённости фильтра необходимо разместить после него потокомер (см. рис. 6, 4). При снижении потока через фильтр ниже значения, обеспечивающего штатную циркуляцию лития, должно производиться переключение на дублирующий фильтр, а засорённый фильтр должен изыматься и направляться на очистку и регенерацию. В связи с тем, что генерируемая в установке пыль, а также возможный твёрдый осадок тритида лития являются радиоактивными, замена и очистка фильтра должны осуществляться с использованием дистанционного обслуживания. Возможность опустошения важна для процедуры замены (см. рис. 6, фильтры 2). При плановом сливе лития при замене фильтров предполагается, что он будет выдавливаться инертным газом в предназначенные для этого ёмкости.

Для поддержания регламентируемого содержания трития в периферийных устройствах установки ДЕМО-ТИН необходима организация контроля качества очистки лития в режиме реального времени от рабочего газа (изотопов водорода) и от азота (основной атмосферный газ, который более активно, чем кислород, влияет на воздействие лития на конструкционный материал ДЕМО-ТИН [16]). Простейшим и

базовым методом диагностики наличия изотопов водорода в литии является дозиметрический. В дополнение к нему можно использовать современный электрохимический датчик водорода [34]. Для диагностики азота можно использовать методику измерения электрического сопротивления лития [31]. Если в литии превышен уровень допустимого загрязнения примесями, то он заменяется чистым, а загрязнённый сливается в систему глубокой очистки.

Перекачка лития. В работе [28] для перекачки жидкого лития рекомендуется механический шнековый насос, который планируется и для нашей системы (см. рис. 6, 1). Скорость перекачки не является единственным его параметром. Необходимо создание требуемого перепада давления для возможности перекачки жидкости определённой вязкости.

Создание перепада давления также является важным моментом при фильтрации лития. В качестве исходных данных были использованы результаты, представленные в разделе 5.1.2.2 монографии [31]. В ней рекомендовалось использовать фильтр, полученный прессованием стопки из 30 нержавеющей сеток саржевого плетения. При этом эффективный размер отверстий составляет 50 мкм, пористость — около 50%. Пропускная способность такого фильтра при перепаде давления 1,96 МПа и температуре 250 °С составляет около 0,12 кг/(см²·ч), на основании чего можно оценить площадь фильтра. При требуемом максимальном потоке 10 г/с необходимая площадь фильтра составит 0,03 м², что является технически реализуемым значением. Вязкость лития $\approx 1,1$ сСт при температуре 200 °С на основе данных [19] незначительно превышает вязкость воды. Для предотвращения значительного повышения вязкости при приближении к температуре плавления замкнутый контур лития должен быть оборудован системой датчиков и нагревателей, поддерживающей в контуре температуру лития ≥ 200 °С. Так как коммерчески доступные шнековые насосы создают перепад давлений в единицы МПа, то изготовление шнекового насоса для перекачки лития выглядит реалистично.

Необходимо подчеркнуть, что перепад давлений является довольно большим, что делает данный участок литиевого цикла наиболее опасным с точки зрения утечек лития. Снижение давления нецелесообразно: в литературе сведений о влиянии наличия неметаллических примесей в литии на его вязкость обнаружено не было, но известно, что металлическая примесь на десятки процентов повышает его вязкость [35].

При выборе материала деталей насоса необходимо учесть, что горячий жидкий литий обладает высокой коррозионной активностью, особенно при загрязнении его примесями [16], а также необходимость функционирования насоса в условиях сильных рассеянных магнитных полей и нейтронного облучения.

Вопросы безопасности литиевого цикла. Во избежание последствий нарушения герметичности компонентов литиевого цикла необходимо локализовать зону аварии, отсечь дистанционно управляемыми клапанами аварийный участок, максимально быстро и безопасно опустошить эти компоненты. Жидкий литий разлагает бетон, являющийся стандартным материалом пола в электрофизических установках. В результате литий загорается в выделяющемся при этом водном паре с высокой температурой ~ 1000 °С [36]. Поэтому под всеми компонентами литиевого цикла должен быть оборудован стальной пол с бортиками, предотвращающими растекание лития по большой площади.

Все литиевые устройства должны быть обязательно оснащены датчиками утечки. «Контактные» варианты датчиков утечки представлены в [37] и являются основными кандидатами для такой диагностики. Помещения, в которых эксплуатируется жидкий литий, должны быть оборудованы специальными системами пожаротушения, обзор которых можно найти в [38].

Безопасность литиевых устройств может определяться взаимодействием лития с теплоносителем при аварии. Толщина слоя жидкого лития в бассейне 1 см выбрана исходя из толщины жидкого лития 3—5 мм в проведённых экспериментах на небольших токамаках CDX-U [39] и HT-7 [40]. Тогда объём лития в бассейне ДЕМО-ТИН секции I дивертора составит 40 л. Взаимодействие лития с водой сопровождается энерговыделением 25,6 МДж·кг⁻¹ [41]. В наихудшем случае, когда 20 кг жидкого лития взаимодействуют с водяным теплоносителем, можно оценить избыточное давление 20 кг·25,6 кДж·г⁻¹/100 м³ ≈ 50 атм. в вакуумной камере ДЕМО-ТИН объёмом 100 м³ при аварии. Допустимое давление внутри вакуумной камеры для обеспечения её целостности заметно меньше и со-

ставляет ≈ 2 атм. [42]. Необходима технико-экономическая проработка стандартной системы предотвращения аварии с избыточным давлением, содержащей рвущуюся диафрагму и балластный объём $\approx 2500 \text{ м}^3$. Следует отметить, что приведённые расчёты отражают оценку снизу по количеству жидкого лития в установке. Аккуратная оценка толщины слоя жидкого лития в бассейне сложна и требует учёта целого ряда физических процессов: испарение лития в районе точки удара с учётом самосогласованного экранирования достигающих её потоков тепла из плазмы SOL, влияние реактивных сил (сил отдачи) при испарении, осаждение лития из литиевого пара в секции I с бассейном, стекание (циркуляция) жидкого лития из секций II, III в секцию I. Создание такой модели выходило за рамки задач представляемой работы и требует дальнейших исследований.

В качестве альтернативы воде в качестве теплоносителя часто рассматривается углекислый газ, но энергия, выделяющаяся при взаимодействии лития с ним, превышает таковую при взаимодействии с водой [36]. Требуется анализ возможности применения в качестве теплоносителя вместо воды инертных газов, например, гелия [43]. Несмотря на низкую по сравнению с водой теплоёмкость газообразного гелия, такая система может быть работоспособной в условиях применения секционированного литиевого дивертора, в котором максимальные тепловые потоки, снимаемые литием и перераспределяемые на внутренние поверхности секций дивертора, не превышают $1 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Отметим, что это значение $1 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$, полученное в [14], может быть заметно — до порядка величины снижено путём увеличения размера секции I в 3 раза. Существующие компактные размеры в дециметровом диапазоне были выбраны из-за необходимости вписаться по габаритам в текущий проект вакуумной камеры ДЕМО-ТИН. Снижение тепловой нагрузки до значения $0,1 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{-2}$ может позволить переход от водяного к гелиевому теплоносителю и существенно снизить взрывопожарную опасность при работе с горячим жидким литием. Подчеркнём, что все приведённые соображения являются предварительными и для оценки безопасности проекта ДЕМО-ТИН требуется провести развёрнутое исследование по примеру выполненного для литиевого контура установки IFMIF [44].

ВЫВОДЫ

Предложена концепция литиевого цикла для токамака ДЕМО-ТИН с секционированным дивертором. Оценены основные параметры технологических систем, сформулированы требования к компонентам и описаны соответствующие технические решения. Максимальный массовый расход лития составляет $\approx 10 \text{ г/с}$. Перекачка лития обеспечивается шнековым насосом. Компонент очистки, объединяющий систему фильтрации и холодную ловушку, позволит снизить содержание примеси азота и рабочих газов в литии от 3 до 10 раз. Для контроля содержания изотопов водорода в жидком литии выбран дозиметрический метод. Диагностика азота обеспечивается измерениями электрического сопротивления лития.

На основе расчётов глубины проникновения частиц плазмы, достигающих первую стенку с энергией 500 эВ, сделана оценка толщины $\approx 0,1 \text{ мкм}$ жидкого литиевого слоя, который может защищать поверхность твердотельной первой стенки. Предложена модель для оценки роста литиевых плёнок на поверхности первой стенки ДЕМО-ТИН. При температуре стенки 200—300 °C рост плёнки происходит линейно со временем, а время формирования слоя толщиной 0,1 мкм составляет $\approx 1 \text{ мин}$. За 3—4 ч толщина плёнки может достигнуть квазистационарных значений 13—15 мкм. При температуре более 340 °C плёнка не формируется из-за роста термического испарения лития.

Поскольку в проекте выбрана температура стенок 700 °C секции дивертора с литиевым бассейном, образование дейтерида и тритида лития в нём не ожидается. Образование дейтерида и тритида лития возможно в жидкометаллическом литиевом покрытии первой стенки при температурах стенки 200—300 °C, что требует дальнейших исследований и верификации.

Размер диверторной секции I желательно увеличить в 2—3 раза с целью снижения максимальных значений плотности потока энергии на внутренние поверхности секций дивертора до $0,3\text{—}0,1 \text{ МВт/м}^2$. Это может позволить переход от водяного к гелиевому теплоносителю и существенно снизить взрывопожарную опасность при работе с горячим жидким литием.

Авторы благодарны П.А. Карасеву за предоставленные результаты расчётов по коду TRIM. Работы поддержаны ГК «Росатом» и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (U3), проект № FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет-инжекции с повышенными производительностью и ресурсом».

REFERENCES

1. Skokov V.G., Sergeev V.Yu., Bykov A.S. et al. Li dust injection experiments into T-10 tokamak. — *Fusion Eng. and Des.*, 2014, vol. 89, pp. 2816—2821.
2. Vershkov V.A., Sarychev D.V., Notkin G.E. et al. Review of recent experiments on the T-10 tokamak with all metal wall. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, p. 102017.
3. Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T. et al. Experimental test of the system of vertical and longitudinal lithium limiters on T-11M tokamak as a prototype of plasma facing components of a steady-state fusion neutron source. — *Ibid.*, 2015, vol. 55, p. 123015.
4. Ono M., Jaworski M.A., Kaita R. et al. Recent progress in the NSTX/NSTX-U lithium programme and prospects for reactor-relevant liquid-lithium based divertor development. — *Ibid.*, 2013, vol. 53, p. 113030.
5. Mazzitelli G., Iafrafi M., Apicella M.L. et al. Comparison between liquid lithium and liquid tin limiters in FTU. — In: *Proc. of 44th EPS Conference on Plasma Physics*. Belfast, 2017.
6. Osborne T.H., Jackson G.L., Yan Z. et al. Enhanced H-mode pedestals with lithium injection in DIII-D. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, p. 063018.
7. Mansfield D.K., Hill K.W., Strachan J.D. et al. Enhancement of Tokamak Fusion Test Reactor performance by lithium conditioning. — *Physics of Plasmas*, 1996, vol. 3, p. 1892.
8. Hu J.S., Ren J., Sun Z. et al. An overview of lithium experiments on HT-7 and EAST during 2012. — *Fusion Eng. and Des.*, 2014, vol. 89, pp. 2875—2885.
9. Maingi R., Hu J.S., Sun Z. et al. ELM elimination with Li powder injection in EAST discharges using the tungsten upper divertor. — *Nucl. Fusion*, 2018, vol. 58, p. 024003.
10. Hu J.S., Sun Z., Li C.Z. et al. ELM mitigation by means of supersonic molecular beam and pellet injection on the EAST superconducting tokamak. — *J. of Nucl. Materials*, 2015, vol. 463, pp. 718—722.
11. Zuo G.Z., Hu J.S., Maingi R. et al. Results from an improved flowing liquid lithium limiter with increased flow uniformity in high power plasmas in EAST. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 016009.
12. Goldston R.J., Myers R., Schwartz J. The lithium vapor box divertor. — *Phys. Scr.*, 2016, vol. 167, p. 014017.
13. Nagayama Y. Liquid lithium divertor system for fusion reactor. — *Fusion Eng. and Des.*, 2009, vol. 84, p. 1380.
14. Skokov V.G., Sergeev V.Yu., Anufriev E.A. et al. Comparison of lithium divertor variants for DEMO-FNS tokamak. — *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* (Journal of technical physics), 2021, vol. 91, p. 567 (in Russian).
15. Shpanskiy Yu.S., the DEMO-FNS Project Team. Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 076014.
16. Mikhailov V.N., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E. et al. Lithium in fusion and space energetics of XXI century. — M.: Energoatomizdat, 1999 (in Russian).
17. Mansfield D.K., Roquemore A.L., Schneider H. et al. A simple apparatus for the injection of lithium aerosol into the scrape-off layer of fusion research devices. — *Fusion Eng. and Des.*, 2010, vol. 85, p. 890.
18. Sergeev V.Yu., Kuteev B.V., Bykov A.S. et al. Conceptual design of divertor and first wall for DEMO-FNS. — *Nucl. Fusion*, 2015, vol. 55, p. 123013.
19. Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A. Physical-chemical basis of lithium use in liquid metal systems of fusion reactor. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez* (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2007, issue 4, pp. 13—44 (in Russian).
20. Verbeek H. and the ASDEX Team. Low energy neutral particle fluxes to the walls of ASDEX during He and D₂ discharges. — *J. of Nucl. Mater.*, 1987, vol. 145—147, p. 523.
21. Kuteev B.V., Sergeev V.Yu., Krylov S.V. et al. Conceptual analysis of a tokamak reactor with lithium dust JET. — *Nucl. Fusion*, 2010, vol. 50, p. 075001.
22. Cengel Y.A., Cimbala J.M. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. — NY.: McGraw-Hill, 2006.
23. Tabares F.L., Oyarzabal E., Martin-Rojo A.B. et al. Reactor plasma facing component designs based on liquid metal concepts supported in porous systems. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, p. 016029.
24. Pisarev A., Moshkunov K., Vizgalov I. et al. Deuterium trapping in liquid lithium irradiated by deuterium plasma. — *J. of Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, p. S1076.
25. Baldwin M.J., Doerner R.P., Luckhardt S.C. et al. Deuterium retention in liquid lithium. — *Nucl. Fusion*, 2002, vol. 42, p. 1318.
26. Eich T., Sieglin B., Scarabosio A. et al. Inter-ELM power decay length for JET and ASDEX upgrade: measurement and comparison with heuristic drift-based model. — *Physical Review Letters*, 2011, vol. 107, p. 215001.
27. Zuo G.Z., Hu J.S., Li J.G. et al. First results of lithium experiments on EAST and HT-7. — *J. of Nucl. Mater.*, 2011, vol. 415, p. S1062.
28. Ono M., Majeski R., Jaworski M.A. et al. Liquid lithium loop system to solve challenging technology issues for fusion power plant. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, p. 116056.

29. **Christenson M., Moynihan C., Ruzic D.N.** A distillation column for hydrogen isotope removal from liquid lithium. — *Fusion Eng. and Des.*, 2018, vol. 135, p. 81.
30. **Hendricks S.J., Carella E., Moreno C. et al.** Numerical investigation of hydrogen isotope retention by an yttrium pebble-bed from flowing liquid lithium. — *Nucl. Fusion*, 2020, vol. 60, p. 106017.
31. **Subbotin V.I., Arnol'dov M.N., Ivanovskij M.N. et al.** Lithium. — M.: Izdat, 1999 (in Russian).
32. **Yagi J., Suzuki A., Terai T.** Nitrogen contamination effect on yttrium gettering of hydrogen in liquid lithium. — *J. of Nucl. Mater.*, 2011, vol. 417, p. 710.
33. **Natesan K.** Influence of nonmetallic elements on the compatibility of structural materials with liquid alkali metals. — *Ibid.*, 1983, vol. 115, p. 251.
34. **Holstein N., Krauss W., Nitti F.S.** Detection of hydrogen as impurity in liquid lithium: an electrochemical hydrogen-sensor for IFMIF-DONES. — *Fusion Eng. and Des.*, 2022, vol. 178, p. 113085.
35. **Gan X., Xiao S., Deng H. et al.** Clustering of Fe atoms in liquid Li and its effect on the viscosity of liquid Li. — *Nucl. Fusion*, 2016, vol. 56, p. 046004.
36. **Piet S.J., Jeppson D.W., Muhlestein L.D. et al.** Liquid metal chemical reaction safety in fusion facilities. — *Fusion Eng. and Des.*, 1987, vol. 5, p. 273.
37. **Furukawa T., Kondo H., Hirakawa Y. et al.** Safety concept of the IFMIF/EVEDA lithium test loop. — *Ibid.*, 2011, vol. 86, p. 2433.
38. **Furukawa T., Hirakawa Y., Kato S. et al.** Current status of the technology development on lithium safety handling under IFMIF/EVEDA. — *Ibid.*, 2014, vol. 89, p. 2902.
39. **Majeski R., Jardin S., Kaita R. et al.** Recent liquid lithium limiter experiments in CDX-U. — *Nucl. Fusion*, 2005, vol. 45, p. 519.
40. **Hu J.S., Zuo G.Z., Li J.G. et al.** Investigation of lithium as plasma facing materials on HT-7. — *Fusion Eng. and Des.*, 2010, vol. 85, p. 930.
41. **McCarthy K.A.** Safety Issues Related to Liquid Metals. — In: *Proc. of APEX Meeting*. Albuquerque, NM, July 27—31, 1998.
42. **Azizov E.A., Ananyev S.S., Belyakov V.A. et al.** Tokamak DEMO-FNS: concepts of magnet system and vacuum chamber. — *VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion)*, 2015, vol. 38, issue 2, pp. 5—18 (in Russian).
43. **Garrett G., Watson J.** Comparison of water, helium, and carbon dioxide as coolants for next generation power plants using TRACE. — *Annals of Nuclear Energy*, 2019, vol. 126, p. 292.
44. **Pinna T., Dongiovanni D.N.** RAMI assessment for IFMIF lithium facility. — *Fusion Eng. and Des.*, 2015, vol. 98—99, p. 2063.

AUTHORS

Sergeev V.Yu. Peter the Great Saint-Petersburg State Polytechnical University, Politekhnicheskaya st. 29, 195251, St. Petersburg, Russia; V.Sergeev@spbstu.ru

Skokov V.G. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kuteev B.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; Kuteev_BV@nrcki.ru

Timokhin V.M. Peter the Great Saint-Petersburg State Polytechnical University, Politekhnicheskaya st. 29, 195251, St. Petersburg, Russia; V.Timokhin@spbstu.ru

Received 12 January 2024

Revised 16 January 2024

Accepted 17 January 2024

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2024, vol. 47, issue 1, pp. 29—40