

УДК 533.9

ТЕКУЩИЙ ЖИДКИЙ ЛИТИЙ КАК МАТЕРИАЛ, ОБРАЩЁННЫЙ К ПЛАЗМЕ

А.А. Писарев¹, А.В. Вертков², М.Ю. Жарков², И.В. Мазуль³, П.Ю. Пискарев³, Г.М. Тарасюк¹¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия²Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея», Москва, Россия³Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

В статье представлен краткий обзор работ различных лабораторий в области исследований, связанных с использованием текущего слоя жидкого лития для применения в качестве обращённых к плазме материалов лимитера и дивертора в токамаках. Рассматриваются теоретическое обоснование системы с низким рециклингом, возможные варианты таких систем, демонстрация положительного результата на токамаке EAST, перспективы использования на других токамаках, сопутствующие исследования, возникающие научные проблемы.

Ключевые слова: дивертор, лимитер, течение лития, рециклинг, жидкий литий, токамак, EAST, смачиваемость.

FLOWING LIQUID LITHIUM AS A PLASMA FACING MATERIAL

A.A. Pisarev¹, A.V. Vertkov², M.Yu. Zharkov², I.V. Mazul³, P.Yu. Piskarev³, G.M. Tarasyuk¹¹National Research Nuclear University «MEPHI», Moscow, Russia²Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering», Moscow, Russia³Joint Stock Company «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St.-Petersburg, Russia

The paper provides a brief overview of research activity related to the use of the flowing layer of liquid lithium as a plasma-facing material of the limiter and divertor in tokamaks. The theoretical substantiation for a system with low recycling, possible variants of such systems, demonstration of positive test results, prospects for using in other tokamaks, related research, and emerging scientific and engineering problems are considered.

Key words: Divertor, limiter, flowing lithium, liquid lithium, recycling, tokamak, EAST, wetting.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-15-28

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей термоядерных исследований является необходимость поиска новых путей для улучшения характеристик плазмы и повышения энергоэффективности в токамаках. Одним из направлений в решении этой задачи является поиск новых материалов, обращённых к плазме, среди которых большой интерес вызывает литий. В значительной степени внимание на него было обращено из-за его геттерных свойств и способности уменьшать тепловые нагрузки на обращённые к плазме материалы за счёт большой теплоты испарения и способности поглощать и рассеивать энергию в паровом облаке, образующемся при испарении. Исходя из этих его свойств, применение лития для поглощения несгоревшего топлива и защиты материалов стенки предлагалось ещё в [1, 2].

Впоследствии внимание к литию было сопряжено с явлением так называемого рециклинга, которое представляет собой обмен изотопами водорода между плазмой и стенкой. При высоком рециклинге практически все частицы топливного материала (дейтерий и тритий), поступая из плазмы на стенку в «горячем» виде, возвращаются обратно в плазму в «холодном» виде. Это приводит к высокой концентрации холодных частиц в периферийной области, резкому охлаждению плазмы за счёт теплопроводности, пикированию температуры, турбулентности, неустойчивости, неудовлетворительному удержанию энергии, большим размерам реактора, сложности нагрева, неэффективному использованию объёма, срывам.

Альтернативой является работа токамака при низком рециклинге. Низкий рециклинг даёт уменьшение концентрации холодного топлива на периферии плазмы, теплопроводности, низкий градиент температуры центральной плазмы, увеличение температуры в центре и на периферии, более полное заполнение объёма камеры реактора, увеличение β , запасённой энергии, подавление турбулентности, срывов и ЭЛМов [3—5].

Впервые внимание на важность уменьшения рециклинга для улучшения характеристик плазмы было обращено в [6, 7]. В частности, этому послужили предшествующие эксперименты на TFTR [8], где были получены рекордные на то время разряды, в которых инжекция лития, который захватывал водород и затруднял его возвращение в плазму, сильно меняла поведение плазмы на границе. Впоследствии расчёты для реактора с размерами порядка JET [9, 10] показали, что, снизив рециклинг со 100% хотя бы до 50% в сочетании с глубокой подпиткой плазмы энергетичными (120—180 кэВ) атомами изотопов водорода путём нейтральной инжекции, можно получить семикратное превышение мощности, выделяемой в реакции, над вкладываемой мощностью.

Для уменьшения рециклинга необходимо, чтобы обращённые к плазме материалы обладали высокими геттерными свойствами по отношению к водороду. Именно таким материалом и является литий. Любой материал, тем не менее, в том числе и жидкий литий, рано или поздно насыщается водородом, поэтому для поддержания низкого рециклинга необходимо обновление верхнего слоя, обращённого к плазме. Это можно сделать, создав текущий по пластине слой жидкого лития, который обновляется прокачкой по замкнутой литиевой петле, так что использованный литий возвращается на пластину, имея низкую концентрацию водорода, что обеспечивает высокую эффективность захвата водорода в течение длительного времени. Создание литиевой петли необходимо и по другим причинам. Одна из них связана с необходимостью уменьшения концентрации радиоактивного трития в пределах вакуумной камеры токамака до значений ниже санитарных норм. Вторая связана с необходимостью очистки лития от твёрдых частиц гидридов и химических соединений с кислородом, углеродом и азотом, которые будут образовываться из-за чрезвычайно высокой химической активности лития. Для этого во внешней части петли должны устанавливаться фильтры.

Физическое обоснование системы с текущим слоем жидкого лития и требования к её характеристикам применительно к проблеме влияния рециклинга на свойства плазмы впервые были детально рассмотрены в [11] для токамака HT-7, и конструкция этой петли была описана в [12, 13].

Наряду с подавлением рециклинга литий выполняет ещё две задачи: поглощает все газовые примеси, уменьшая их поступление в плазму и потерю мощности на излучение, а также снижает тепловую нагрузку на поверхность при взаимодействии с плазмой, что делает его весьма перспективным материалом для лимитеров и диверторов термоядерных реакторов, которые воспринимают большие потоки плазмы [14—16].

Эксперименты с лимитером с текущим слоем жидкого лития, проведённые на токамаках HT-7 и EAST, описанные в обзорах [3, 4, 17], продемонстрировали ожидаемые достоинства такой системы.

Нужно заметить, что аналогичную функцию подавления рециклинга и рекуперации трития могут выполнять и другие системы с жидким литием, например, жидкометаллический душ, окружающий плазму, который предлагается для стелларатора FFHR-d1 [18], стенка, полностью покрытая текущим по ней литием, как предлагается для FNSF [19, 20], замкнутая система типа открытой литиевой ёмкости [21, 22] или дивертора типа парового бокса [23], а также закрытый секционированный литиевый дивертор, предложенный для DEMO [21, 24, 25] и ТИН [26]. Для NSTX-U рассматривался вариант дивертора, на поверхность которого литий подаётся по большому количеству капиллярных каналов из внутренних резервуаров, расположенных под всей поверхностью пластины, после чего литий растекается по всей поверхности пластины [27, 28]. Эти конструкции гораздо более сложны в инженерном отношении и проработаны только на уровне предложений и оценочных расчётов в отличие от систем с литием, текущим по пластине, и КПС, которые испытываются как на тестовых стендах, так и в токамаках.

Помимо систем с текущим литием, в течение многих лет активно развиваются и другие направления использования лития.

Существенный прогресс достигнут при использовании лимитеров на основе капиллярно-пористых систем (КПС) [29—34], в которых пористая среда (например, металлическая сетка) в контакте с жидким литием пропитывается литием и литий образует тонкий слой жидкости на поверхности. КПС начали развиваться задолго до появления систем с текущим литием. Они использовались на многих токамаках и продемонстрировали впечатляющие результаты по улучшению свойств плазмы. Однако до сих пор эти системы использовались как статические, без циркуляции лития по литиевой петле, и в таких системах

возможно накопление большого количества трития. Использование замкнутой литиевой петли, дополненной устройством для регенерации трития, устраняет эту проблему [3, 32].

Существенное улучшение параметров плазмы в режиме низкого рециклинга наблюдалось также в экспериментах на CDX-U со статически тороидальным жидким лимитером [35].

Замечательные результаты по улучшению параметров плазмы получены во многих экспериментах по литиизации стенок на EAST, TFTR, T-11M, FTU, NSTX, DIII-D, LTX- β , HT-7 [5, 29, 30, 36—42], в том числе со стенками, покрытыми жидким литием. Улучшение свойств плазмы в значительной степени связывалось с уменьшением рециклинга и количества примесей. Обзор работ по литиизации представлен в [3] наряду с другими методами использования лития. Нужно отметить также LTX — токамак с жидкими стенками, который показал обнадеживающие результаты по удержанию плазмы [43].

Системы с текущим слоем лития и литиевой петлей отличаются от систем со статическим слоем жидкого или твёрдого лития, в первую очередь возможностью удаления трития из лития за пределами камеры токамака, что критически важно для уменьшения количества захороненного трития в камере токамака, уменьшения опасности выпадения твёрдых гидридов и поддержания низкого рециклинга в течение длительного периода времени за счёт обновления слоя лития, обращённого к плазме.

ТЕКУЩИЙ ЛИТИЙ В ТОКАМАКАХ

Демонстрация эффективности систем с текущим по поверхности пластины литием была сделана на китайских токамаках HT-7 и EAST. В экспериментах на HT-7 [4, 12, 17] испытывались различные варианты лимитеров, в том числе лимитеры на основе КПС и на основе текущего лития, результаты которых суммированы в [4]. Результаты экспериментов на HT-7 продемонстрировали возможности лимитеров с жидким литием и послужили базой для проведения экспериментов на токамаке EAST, где было проведено четыре кампании с различными конструкциями лимитеров с текущим литием. Лимитеры в виде пластины устанавливались вблизи экваториальной плоскости с отрицательным наклоном 15° к горизонту. Литий подавался на пластину с помощью электромагнитных насосов в распределитель в верхней части пластины, стекал по пластине, собирался в её нижней части в коллектор и выводился за пределы вакуумной камеры, чтобы затем вновь быть использованным посредством постоянно циркулирующей литиевой петли.

В первой кампании 2014 г. [44—46] для поддержки текущего слоя лития использовалась биметаллическая пластина из меди (для обеспечения теплоотвода), покрытой с помощью пайки тонкой (0,1 мм) фольгой из нержавеющей стали (совместимой с литием). Макет был сконструирован и изготовлен в PPPL как первый образец системы с непрерывно текущим (на самом деле медленно ползущим) жидким литием (24/7-FLiLi). Расход лития составлял $2 \text{ см}^3/\text{с}$, что, как было показано в [1], обеспечивало поглощение 10^{22} D/c . Использование литиевого лимитера в этой кампании привело к уменьшению рециклинга на 33%, что повлекло за собой улучшение параметров плазмы, в том числе к уменьшению количества срывов, частичному подавлению ЭЛМов, уменьшению количества примесей в плазме. Однако всего 30% поверхности было покрыто литием, наблюдались локальные перегревы паяного соединения и повреждение поверхности лимитера, хотя и редко, но наблюдался выброс капель до 1 мм, быстро вышел из строя распределитель. Система хорошо работала только при низкой мощности дополнительного нагрева — всего 1,9 МВт.

Для второй кампании 2016 г. [16, 47] толщина слоя стали была увеличена до 0,5 мм, соединение стали и меди было выполнено горячим изостатическим прессованием (ГИП). Для лучшего растекания лития по пластине она была механически шлифована поперёк направления течения лития с размером неровностей порядка микрометра. Также была улучшена структура распределителя, сделано гелиевое охлаждение и установлено два электромагнитных насоса. В результате 70% поверхности пластины было покрыто литием, осуществлялся более равномерный теплоотвод, повышена до 4,5 МВт допустимая мощность дополнительного нагрева. Тем не менее степень покрытия поверхности была недостаточной, наблюдалась эрозия стали. Кроме того, вся конструкция оказалась ненадёжной и быстро вышла из строя.

В третьей кампании 2018 г. [48] пластина была изготовлена из молибденового сплава TZM (Ti—Zr—Mo, 98% Mo), который обладает более хорошей смачиваемостью литием и стойкостью к воздействию плазмы. В результате была увеличена до 80% доля поверхности пластины, покрытой литием, отсутствовали пятна перегрева, увеличено сопротивление эрозии пластины, повышена допустимая мощность дополнительного нагрева до 8,3 МВт. Были улучшены все основные параметры плазмы, также показано, что выброс капель незначительно влиял на работоспособность системы. Система, однако, была также ненадёжной.

В четвёртой кампании 2020 г. [49] был изменён подход к организации течения лития, который был предложен в UIUC [50, 51]. Плоская пластина была заменена на пластину с вертикальными желобками глубиной 0,5 мм и шириной 2 мм. Температура в них уменьшалась по глубине, и возникающая термо-ЭДС на границе раздела лития и молибдена провоцировала ток вдоль его стенок. Электромагнитная сила, возникающая при взаимодействии тока с магнитным полем, двигала литий вдоль желобка. Таким образом, течение лития обеспечивалось комбинацией термоэлектромагнитогидродинамических сил (ТЕМН) и силы тяжести. Литиевый лимитер вводился в установку на 0—4 см глубже, чем основной молибденовый лимитер, принимая большую нагрузку. Продемонстрировано положительное влияние лимитера на свойства плазмы при мощности нагрева 8,7 МВт. Пластина имела более высокие эксплуатационные качества, около 87% поверхности было покрыто текущим литием. Однако вся конструкция оказалась механически ненадёжной и вышла из строя уже при тепловой нагрузке 2 МВт/м².

Опыт использования лимитеров с текущим слоем жидкого лития, несмотря на их конструкторские недостатки, подтвердил все физические ожидания, которые возлагались на эту систему. Основные результаты, полученные в четырёх кампаниях на EAST, можно свести к следующему:

- уменьшен рециклинг;
- существенно подавлены срывы;
- существенно подавлены большие ЭЛМы;
- уменьшен поток тепла в дивертор;
- уменьшено количество тяжёлых и лёгких примесей в плазме;
- увеличена запасённая в плазме энергия;
- облегчён переход в H-моду;
- обеспечены геттерные свойства;
- большое количество испаренного лития обеспечивало экранировку не только материала лимитера,

но и всей первой стенки.

Хотя система с текущим жидким литием изначально предлагалась для применения в качестве дивертора, до сих пор она испытана только в качестве лимитера. Однако полученные результаты, несмотря на выявленные инженерные проблемы, позволили рассматривать её для применения в диверторной конфигурации в токамаках.

Диверторы с жидким литием устанавливались в HT-7 и CDX-U, но они имели статический слой лития [5, 52], тем не менее даже их использование улучшало параметры плазмы.

Диверторы с текущим по поверхности слоем лития или олова разрабатываются для FNSF [19, 22, 53, 54], NSTX [56], EU-DEMO [56] и ASDEX-U [57]. В качестве опции жидкометаллический дивертор рассматривается также и для токамаков T-15MD [58] и TPT [59]. Поскольку предполагается, что альтернативные варианты диверторов будут анализироваться на более поздних стадиях работы установок, то конкретные конструкции будут выбираться позже. Для исследования различных конфигураций диверторов для DEMO, включая жидкометаллические конфигурации, проектируется специализированный токамак DTT с $R = 2,19$ м, $r = 0,7$ м, $B = 6$ Тл, $I_p = 5,5$ МА, $P_{tot} = 45$ МВт [60, 61], который уступает ITER и DEMO, но превосходит EAST по всем перечисленным параметрам и JET по магнитному полю, мощности нагрева и току плазмы. Задачами DTT являются работа с обычным дивертором с размерами примерно как у ITER и DEMO и исследование альтернативных материалов и различных концепций дивертора, включая жидкометаллический дивертор.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ

Использование жидких металлов, обращённых к плазме, вызывает много вопросов [14, 15], которые требуют анализа. Среди них стоит выделить:

- эрозия лития (выброс лития, осушение подложки и её эрозия);
- смачиваемость поверхности и равномерность течения;
- рециклинг, накопление и рекуперация трития;
- загрязнение лития за счёт химических реакций (О, С, Н, металлы, удаление твёрдых выделений);
- деградация металлов (коррозия, охрупчивание, склонность к нейтронному повреждению);
- течение лития в петле.

Существенным вопросом является стабильность поверхности жидкого металла при взаимодействии с плазмой. Взаимодействие токов из плазмы, которые текут через слой жидкого металла, с магнитным полем, а также релей-тейлоровская неустойчивость, возникающая при набегании более плотной жидкости на менее плотную, могут приводить к дестабилизации поверхности [62], расплескиванию и выбросу капель, которые наблюдались в ряде работ на испытательных стендах и в токамаках. Эмиссия слишком большого количества лития в плазму при взаимодействии плазмы с литиевой поверхностью приводила к срывам в HT-7 [63], DIII-D [64]. Выброс капель лития в HT-7 и EAST приводил к затруднению обратного перехода H—L [65], к деградации плазмы и срывам [63]. Однако оказалось, что плазма чувствительна к этому эффекту в L-моде и H-моде с низкими параметрами и гораздо менее чувствительна в H-моде с высокими параметрами [65]. Это можно связать с тем, что паровое облако, образующееся при эрозии лития, уменьшает тепловую нагрузку на поверхность. Эффект существенно усиливается при увеличении магнитного поля и потока плазмы на стенку. Так, в NSTX выброса лития не наблюдали, а в DIII-D с более сильным полем и током выброс капель был зарегистрирован во время ЭЛ-Мов [64]. Выброс капель, как оказалось, возможен и без магнитного поля из-за проблем с неоднородностью течения и наличием препятствий на пути потока (например, твёрдые осадки загрязнений). В [66] на экспериментальном стенде с текущим литием в отсутствие магнитного поля наблюдали выброс капель размером 0,05—0,35 мм, средним размером 0,175 мм. В Magnum-PSI [33] выброс капель олова наблюдался из различных КПС с использованием сеток, спечённого вольфрама и вольфрама, созданного 3-D-печатью. Выбросу капель способствует избыточное заполнение пористых структур жидким металлом. В ряде работ, однако, было показано, что использование капиллярно-пористых структур уменьшает разбрызгивание лития [4, 30, 44]. Несмотря на имеющиеся наблюдения образования капель, можно ожидать, исходя из опыта HT-7 и EAST, что выброс капель не будет существенным фактором в плотной высокотемпературной плазме. На это также позволяет надеяться опыт по литиизации стенок токамаков путём инъекции лития в плазму.

Эрозия лития при взаимодействии с плазмой существенно более интенсивна, нежели просто испарение. Так, оценки количества лития, выброшенного с лимитера EAST во время импульса длительностью 10 с, примерно в 2—3 раза больше, чем количество лития, испаренного за 600 с между импульсами [47]. Помимо расплескивания и выброса капель, эрозия возможна за счёт распыления и испарения. Физическое распыление лития существенно только при низких температурах, когда испарение ничтожно. Однако поток испаренного вещества экспоненциально зависит от температуры, при рабочих температурах дивертора порядка 350 °С. Как показали расчёты для ДЕМО-ТИН [67], испарение идёт гораздо более интенсивно, нежели распыление. Экспериментальные измерения эрозии лития оказались существенно ниже расчётных. Это объяснялось тем, что испаренный литий формирует плотное паровое облако над поверхностью, которое наблюдалось экспериментально и которое не только уменьшает поток энергии на поверхность, но и приводит к возврату лития на поверхность в результате столкновений [68]. Экранирование за счёт образования парового облака может позволить увеличить допустимую температуру лития.

Испаряющийся литий, тем не менее, проникает в плазму, влияя на её свойства, и осаждается на стенках токамака. Однако в системе с низким рециклингом на EAST частота и интенсивность нештатных событий существенно уменьшались и негативного влияния эрозии лития с лимитера не наблюдалось. Литий, эмитированный с лимитера, обнаруживался в виде облака в периферийной плазме [67]. В

[13] также сообщается, что в NSTX не наблюдали лития в центре плазмы при использовании напыленного лития. Эти результаты позволяют надеяться на такое же развитие событий и в других токамаках. Более того, осаждение лития на стенки можно рассматривать и как положительный эффект [3], поскольку геттерирование литием используется в современных токамаках, в том числе путём инъекции лития в плазму. При большой мощности, выделяемой на диверторных пластинах, возможно, придётся принимать меры для предотвращения поступления чрезмерно больших потоков лития в плазму. Как один из вариантов в диверторе с текущим литием можно установить дополнительную пластину напротив приёмной пластины для сбора лития и возврата его в литиевую петлю.

Слой текущего лития выполняет, по крайней мере, две функции: захват водорода и защита поддерживающей его поверхности. Обычно 0,1—0,2 мм считается приемлемой толщиной, хотя в экспериментах толщину текущего лития никто не измерял, ограничиваясь измерениями количества протекающего лития.

Скорость течения лития и толщина текущего слоя должны обеспечить поглощение основного количества водорода. Оценки [11] дают необходимое значение скорости 0,1 см/с. В экспериментах на EAST [44] скорость течения составляла 2 см/с, а в экспериментах на стенде MaTH-Li [66] равномерное покрытие пластины и устойчивое течение по ней наблюдались при 15 м/с и расходе лития порядка 1,5 м³/ч. Толщина слоя лития не сообщалась, но её легко оценить как 0,1 мм, исходя из расхода лития, скорости течения и размеров пластины. Очень высокая скорость течения, возможно, и приводила к выбросу капель при встрече потока лития с препятствиями на его пути, которые были зарегистрированы видеосъёмкой. Возникает вопрос, а будет ли поток с такой скоростью устойчивым в магнитном поле.

Обеспокоенность вызывает вопрос о локальном осушении поверхности пластины при испарении большого количества лития, что может приводить к эрозии поддерживающего поток лития металла, который имеет существенно более высокий атомный номер. Предполагается, однако, что литий из соседних областей быстро заполнит осушаемое пятно, особенно, если поверхность будет микротекстурирована и капиллярные эффекты на ней будут способствовать этому [31]. Эрозия и появление тяжёлых элементов материала пластины наблюдались в плазме EAST в первых кампаниях с жидкометаллическим лимитером, но это происходило, в основном, из-за того, что степень покрытия поверхности была мала. В третьей и четвёртой кампаниях покрытие поверхности было больше и концентрация тяжёлых примесей в плазме была мала [48, 49]. Эффективный заряд в третьей кампании уменьшился с 2,1 до 1,6, а количество тяжёлых примесей в плазме при использовании лимитера с текущим литием было даже меньше, нежели при литийзации поверхности. Это свидетельствует, что поверхность лития способна к самозалечиванию. Защите от локальных перегревов могут способствовать также такие свойства лития, как большая теплота испарения, которая снижает тепловую нагрузку, и образование парового облака, в котором поток плазмы теряет энергию и рассеивается по большой площади. Отсутствие тяжёлых примесей в плазме наблюдалось также на FTU при использовании КПС, где единственной примесью в плазме был литий [30]. Паровое облако лития защищало поддерживающий его металл от эрозии при нагрузках 5 МВт/м².

Существенной проблемой поверхности, поддерживающей литий, как показали все эксперименты с текущим литием, являются её смачиваемость и равномерность течения лития по ней. Исследования смачиваемости показали, что она улучшается с температурой. Критический угол смачивания у всех металлов (даже литиефобных) снижается до 20—30° при температуре порядка 400—450 °С [69]. Однако экспоненциальный рост скорости испарения с температурой и увеличение рециклинга при высоких температурах налагают ограничения на температуру лития. В наиболее удачных экспериментах по течению [66] температура поддерживалась на уровне 350 °С.

Для улучшения смачиваемости и уменьшения температуры предпринимаются различные меры по обработке поверхности. Плохая смачиваемость обусловлена в значительной степени загрязнением поверхности лития и подложки. Загрязнение лития будет происходить из-за коррозии подложки и реакции с газами, поступающими из подложки, вакуумной системы и литиевой петли. Выдержка лития даже в хорошем вакууме в течение длительного времени ухудшала смачиваемость за счёт окисления лития [42, 70, 71]. Поэтому обезгаживание всей вакуумной системы и литиевой петли, а также тщательная

очистка всех поверхностей, контактирующих с литием, приводят к улучшению смачивания и течения лития по пластине [66, 70].

Эффективным методом увеличения смачиваемости, которое наблюдалось при измерениях смачиваемости и затем использовалось при работе на токамаках и экспериментальных стендах, является предварительное покрытие поверхности литием [4, 66, 69, 70], поскольку в этом случае литий взаимодействует не с металлом подложки, а со свежей поверхностью лития. Нанесение свежей плёнки лития на SS, Mo, TZM, W, Ta делало поверхность литиефильной при всех температурах, начиная с температуры плавления [69, 70]. Поэтому предварительное покрытие поверхности лимитера литием перед загрузкой в токамак проводилось на EAST в загрузочной камере при высокой температуре [44].

Положительный эффект оказывают тонкие плёнки литиефильных материалов, наносимых на поверхность [72]. Очистка поверхности плазмой также показала себя хорошо [69, 70]. Поверхность нержавеющей стали после обработки в плазме стала литиефильной при всех температурах, начиная с температуры плавления.

Существенное влияние на смачиваемость оказывает текстурирование поверхности. Текстурирование с характерными размерами в единицы—сотни микрон делает поверхность более литиефильной и обеспечивает равномерное распределение лития по поверхности из-за капиллярных эффектов [31].

Микротекстурирование поверхности можно создать механической или иного вида обработкой. Например, создание капиллярных бороздок перпендикулярно направлению течения лития в EAST позволило улучшить равномерность потока лития по пластине [16, 44—47]. Создание арочной структуры микрокапилляров на стали поперёк течения лития позволило почти полностью смочить поверхность пластины в стендовых экспериментах по течению лития [66].

В [73], однако, текстурирование путём создания ряби с нанометровыми размерами на поверхности молибдена привело к обратному эффекту — увеличению температуры смачивания. Неясно, однако, являлось это следствием нанометровых размеров структуры или окислением поверхности при лазерной обработке.

Микротекстурирование поверхности можно создавать, используя трёхмерные капиллярно-пористые конструкции на поверхности, которые обеспечат равномерное покрытие поверхности литием, как это происходит в КПС. Решение, которое приходит на ум в первую очередь — это покрытие поверхности капиллярной сеткой, как предлагается в [32]. Возможно использование однослойных или двухслойных сеток [4, 32]. Для EU-DEMO предлагается дивертор [56] с оловом, текущим по поверхности пористого вольфрама, полученного трёхмерной печатью, который исследовался на смачиваемость в [71]. Рассматриваются также такие структуры, как пористый (вспененный) молибден [74], композитный борид лития [75], вольфрамовый пух [76], пористый вольфрам, легированный цирконием [77], спечённый пористый вольфрам на вольфраме [57].

Одна из проблем таких структур — способность тонкого слоя лития защитить поддерживающую его металлическую основу от высоких тепловых нагрузок. Эта способность была продемонстрирована в ряде экспериментов. Эрозии сетки не обнаружено в [78] при облучении молибденовой КПС с литием потоком плазмы 2 МВт/м^2 в течение 200 мин. Испытания дивертора из пористого молибдена, покрытого статическим слоем жидкого лития в NSTX [79] показали, что в разрядах с мощностью нагрева 5 МВт линии молибдена в плазме не наблюдаются, что свидетельствует, что даже статический слой лития защищает текстурированную структуру от эрозии. Устойчивость КПС при воздействии потоков плазмы до 12 МВт/м^2 продемонстрирована в COMPASS [80]. Испытания четырёх разных КПС, заполненных оловом, проводили в OLMAT NHF [34]: вольфрамовые сетки (CIEMAT), вольфрамовый войлок (ENEA), спечённые электроискровым методом вольфрамовые диски (DIFFER) и пористые вольфрамовые структуры, полученные трёхмерной печатью (DIFFER). Испытания показали, что образцы пористого вольфрама, полученного трёхмерной печатью в DIFFER [81], продемонстрировали наилучший результат (до 60 МВт/м^2), а синтезированный пористый вольфрам показал наихудший результат, разрушившись при 15 МВт/м^2 . Способность литиевых КПС выдерживать интенсивные импульсные нагрузки продемонстрирована в экспериментах с плазменными пушками QSPA, MK-200UG, PLM [31], а также в экспериментах на Magnum-PSI с оловянной КПС [33]. Это делает пористые покрытия весьма перспективными для дивертора с высокой нагрузкой, как, например, в DEMO.

Неполное покрытие поддерживающих пластин литием и неравномерность течения лития по ним были первой проблемой, с которой столкнулись при работе с ними. Для поддержки текущего слоя жидкого лития рассматриваются два варианта пластин [4]. В одном из них [16, 44—48] литий течёт под действием силы тяжести по плоской или микротекстурированной поверхности. Во втором [49—51] литий течёт вдоль желобков миллиметровых размеров под действием силы тяжести и термоэлектромagnetогидродинамических сил (ТЕМНД), которые возникают из-за взаимодействия магнитного поля токамака и электрического тока, текущего по стенке желобка, который стимулирован термо-ЭДС, возникающей из-за разности температур на поверхности пластины и на дне желобка.

В экспериментах на EAST не удавалось достичь покрытия поверхности более 80% при течении лития под действием силы тяжести. Однако испытания течения под действием силы тяжести в установке MATN-Li [66] продемонстрировали почти полное покрытие поверхности литием и равномерное течение при соблюдении определённых условий. Было показано, что равномерное смачивание и устойчивое течение можно обеспечить, если создать систему микробороздок в форме арок на поверхности пластины поперёк направления течения лития, хорошо обезгазить всю систему длительным прогревом, предварительно смочить пластину избыточным потоком лития при повышенной температуре, поддерживать пластину и всю петлю при температуре порядка 350 °C в течение всего времени работы и обеспечить достаточно высокую скорость течения. Эти условия можно рассматривать как рекомендуемые для дальнейших работ.

Что касается второго варианта течения в желобках под действием ТЕМНД, то его использование в четвёртой кампании EAST оказалось более успешным [49], нежели первого. Покрытие поверхности составило 87%. Напротив, в экспериментах на HT-7 [4] система с ТЕМНД оказалась менее удачной, нежели остальные варианты лимитера, возможно, из-за недостаточно хорошего смачивания всей системы и желобков. Расчёты [82] показали, что даже при небольших скоростях течения в желобках порядка 1 см/с возможны проблемы, связанные с осушением желобков. Расчёты показали, однако, что этот эффект частично подавляется путём организации специальной формы желобков.

Пластина, поддерживающая литий, должна иметь хорошую теплопроводность и коррозионную стойкость. Возможны два варианта изготовления плоских пластин. Первый — это биметаллическая пластина с тонким слоем коррозионно-стойкой нержавеющей стали (возможно вольфрама или молибдена) на теплоотводящей пластине из меди или медном сплаве (как в первой и второй кампаниях на EAST). Второй — это пластина из вольфрама или молибдена (как в третьей кампании на EAST), которая имеет меньшую, нежели медь, теплопроводность, но представляет меньшую опасность с точки зрения литиевой коррозии, эрозии потоком плазмы и стойкости биметаллического соединения при циклических тепловых нагрузках. Биметаллические пластины для EAST изготавливались либо пайкой, либо горячим изостатическим прессованием. В [83] описаны три технологии создания биметаллических пластин и их испытаний: мозаичная вакуумная пайка медных плиток 2×2 см на стальную фольгу, горячее изостатическое прессование фольги из нержавеющей стали и меди и химическое осаждение вольфрама из пара. Все три пластины показали устойчивость соединения при термоциклических испытаниях (100—500 °C с нагрузкой электронным пучком до 8 МВт/м² поглощённой мощности при охлаждении водой), равномерность теплоотвода, отсутствие пятен перегрева. Испытания проводились без лития на поверхности, с литием тепловая нагрузка может быть увеличена кратно. Следов литиевой коррозии медной пластины с осаждённым слоем вольфрама не обнаружено.

Серьёзную проблему представляет образование твёрдых микрочастиц — продуктов химического взаимодействия лития с газами и металлами, которые могут забивать микропоры в распределителе и капиллярных системах. Загрязнение газообразными продуктами с образованием разнообразных твёрдых соединений наблюдалось во всех лабораторных экспериментах по изучению смачивания. На литии, согласно РФЭС, образуются такие соединения, как LiOH, Li₃N и Li₂CO₃ [70], которые в конечном итоге образуют корочку на поверхности [69, 70] даже в вакууме 10⁻⁶—10⁻⁵ торр [71]. Поэтому перед загрузкой лития в петлю необходим длительный (порядка суток и более) прогрев всей системы при температурах, обеспечивающих обезгаживание, в первую очередь удаление воды. Опасность представляет длительный контакт с воздухом, если камера токамака вскрывается на обслуживание. Необходима

разработка технологии покрытия открытой поверхности лития неким легко удаляемым барьерным слоем для предотвращения реакции с атмосферными газами.

Загрязнение лития возможно также из-за коррозии материалов в контакте с ним. Так, в NSTX и NSTX-U [84] констатировали загрязнение лития углеродом при взаимодействии с углеродными стенками. Загрязнение лития возможно и при коррозии металлов в литии. Коррозия нержавеющей стали SS 304 становится существенной уже при 300 °C на временном интервале 1000 ч [85, 86]. Литий разлагает окисел хрома, после чего реагирует со всеми элементами стали.

Образование твёрдых выделений гидридов в жидком литии возможно также при большом количестве поглощённого дейтерия или трития.

В системах с текущим литием его очищение можно организовать за пределами вакуумной камеры, установив фильтры и систему рекуперации водорода в выходном канале литиевой петли [13]. В КПС-системах также можно обновлять поверхностный загрязнённый слой, организовав циркуляцию лития. Это можно сделать как с помощью внешней литиевой петли, как в [32], так и с помощью электромагнитных сил в замкнутых внутрикамерных системах [87]. Как возможный вариант можно использовать также периодическую очистку свободной поверхности лития плазмой. Обновление поверхности лития в КПС на токамаке T-11M достигается частичным возвращением (15%) испаренного лития из периферийной плазмы в холодную зону КПС и далее в зону испарения посредством капиллярных сил. Однако в системах с внутрикамерным оборотом трития остаётся открытым вопрос о количестве накопленного трития в токамаке.

Одной из инженерных проблем систем с текущим литием остаётся организация равномерной подачи лития на пластину посредством так называемого распределителя. Эта проблема обозначилась на EAST, когда обнаружилось, что часть выходных отверстий распределителя просто не работала. Это было обусловлено в том числе недостаточной смачиваемостью в системе и неравномерностью давления в потоке лития в направлении к выходным отверстиям. Поэтому рассматривается большое количество разных вариантов таких распределителей, которые должны обеспечить более-менее равномерную подачу лития [48, 66].

Возобновление литиевого слоя, стекающего по пластине, обеспечивается литиевой петлёй, подающей литий в распределитель и собирающей его после стекания в коллектор [11—13]. Движение лития по петле осуществляется, как правило, электромагнитными насосами, которые устанавливаются либо в камере токамака и работают, используя собственное магнитное поле токамака, либо за пределами токамака для облегчения обслуживания. Для экспериментальных систем существуют также варианты циркуляции лития под действием газового давления с использованием аргона как инертного газа [66].

Взаимодействие лития с металлами, контактирующими с ним, может стать проблемой с точки зрения сохранения физико-химических свойств металлов в установках, работающих продолжительное время. До сих пор не было проблем, например, с использованием нержавеющей стали, однако они могут возникнуть при длительном использовании в реакторе. Анализ коррозии металлов при контакте с литием [85] привёл к выводу, что при одинаковых условиях потери веса после контакта с жидким литием уменьшались в ряду $\text{Cu} > \text{SS304} > \text{TZM} > \text{Mo} > \text{W}$. Коррозия нержавеющей стали SS304 становилась существенной уже при 300 °C на временном интервале 1000 ч. При увеличении температуры до 350 °C, которая использовалась в лимитерах до сих пор, коррозия будет больше. Коррозия Mo и TZM при 250 °C незначительна на временах порядка тысяч часов, но при больших временах TZM может представлять проблему [88]. В [86] испытания проводили при 300 °C в течение 2000 ч. Было показано, что W, Mo, SS304, SS316, Inconel 625, SS316, покрытая серебром, и алюминиевая бронза имели скорость коррозии $< 1,0$ м/год, что представляется приемлемым для будущих установок. Однако SS316, покрытая серебром, и алюминиевая бронза продемонстрировали значительную деградацию в ходе испытаний. Следует иметь в виду, что результаты испытаний на коррозию, выполненные в статическом жидком металле, дают заниженные результаты по сравнению с результатами испытаний в текущем металле. Поэтому и выводы могут оказаться совершенно другими. Коррозия может усиливаться также электрическими токами, текущими между литием и металлом в контакте с ним. Возникает также непростой вопрос, будет ли коррозия зависеть от нейтронного облучения, поглощения водорода и накопления гелия, и наоборот, будет ли она влиять на эти процес-

сы. И, наконец, будет ли это всё влиять на механические свойства, в том числе охрупчивание металлов. Эти вопросы пока не анализировались.

Помимо этого, существует большое количество вопросов, которые также не проработаны. В их числе можно упомянуть следующие: окисление лития при вскрытии вакуумной камеры на длительное время, отслаивание толстого осаждённого на стенки слоя лития, содержащего тяжёлые примеси, и последствия его попадания в плазму, накопление большого количества трития и тритиевая безопасность, фильтрации твёрдых выделений в литии, эффекты в трубках литиевой петли, когда возможны замедление потока или его полное заклинивание при течении в магнитном поле, загрязнение лития гелием и другие.

Необходимо отметить, что, помимо лития, большой интерес вызывает олово. В частности, дивертор с текущим оловом предлагается для европейского DEMO [56]. Выбор олова был обусловлен в первую очередь меньшим окислением в периоды длительного контакта с атмосферой при остановках реактора, меньшим содержанием захороненного внутри реактора трития из-за высокого рециклинга, дешёвой и отсутствием опасности возгорания или взрыва. В пользу олова также приводится ожидание того, что его концентрация в плазме будет меньше, чем лития, так что, несмотря на его больший атомный номер, $Z_{эф}$ могут оказаться примерно одинаковыми. Олово, однако, как и литий, имеет свои недостатки, которые тоже существенны. Олово имеет худшую смачиваемость и нуждается в более высокой рабочей температуре. Олово оказывается более агрессивным металлом, нежели литий. Высокий рециклинг, необходимый для уменьшения количества захороненного трития, можно рассматривать не как достоинство, а как серьёзный недостаток с точки зрения влияния на плазму. Тем не менее олово и сплавы олова с литием и галлием, равно как и литий, активно исследуются в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические расчёты свидетельствуют, что низкий рециклинг топлива в токамаках является ключом к получению высоких характеристик плазмы и высоких значений Q . Низкий рециклинг может быть обеспечен при использовании диверторов и лимитеров с текущим слоем жидкого лития. Эксперименты на токамаках HT-7 и EAST с лимитерами с текущим литием продемонстрировали уменьшение рециклинга и, как следствие, существенное подавление срывов и больших ЭЛМов, увеличение запасённой в плазме энергии, облегчение перехода в H-моду, уменьшение потока энергии на первую стенку и диверторные пластины.

Практическая реализация полномасштабного дивертора требует анализа ряда физических и инженерных проблем, таких как стабильность поверхности лития и литиевого потока, эрозия лития, смачиваемость поверхности и равномерность течения, накопление и рекуперация трития, загрязнение лития за счёт химических реакций с газами и металлами и очистка лития от твёрдых химических выделений, коррозия и деградация свойств металла, влияние нейтронного повреждения, течение лития в системе снабжения.

Тем не менее опыт, накопленный на токамаках HT-7 и EAST и испытательном стенде MATN-Li, а также многочисленные сопутствующие работы на токамаках и лабораторных стендах позволяют надеяться, что система с текущим слоем лития будет полезной и востребованной.

Авторы благодарны Л.Е. Захарову и С.В. Мирнову за ценные рекомендации при подготовке статьи. Авторы благодарны ГК «Росатом» за поддержку работ по данной тематике в рамках контрактов №774/152-Д и № 774/833-Д с ЧУ «Наука и инновации».

REFERENCES

1. **McCracken G.M., Ertents S.K.** Ion burial in the divertor of a fusion reactor. — In: B.N.E.S. Nuclear Fusion Reactor Conference at Culham Laboratory, Sept. 1969, Paper 4.2.
2. **Emmert G.A., Donhowe J.M., Mense A.T.** Poloidal Divertor for the Wisconsin Tokamak Reactor. — J. of Nuclear Materials, 1974, vol. 53, pp. 39—42; doi: 10.1016/0022-3115(74)90217-7.
3. **Hu J.S., Li L., Zuo G.Z. et al.** A review of lithium application for the plasma-facing material in EAST Tokamak. — Reviews of Modern Plasma Physics, 2023, 7:9; doi: org/10.1007/s41614-023-00114-7.

4. **Zuo G.Z., Ren J., Hu J.S.** Liquid lithium surface control and its effect on plasma performance in the HT-7 tokamak. — *Fusion Eng. and Des.*, 2014, vol. 89, pp. 2845—2852; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2014.05.020.
5. **Hu J.S., Zuo G.Z., Li J.G. et al.** Investigation of lithium as plasma facing materials on HT-7. — *Ibid.*, 2010, vol. 85, pp. 930—934; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2010.08.034.
6. **Krashennikov S.I., Zakharov L.E., Pereverzev G.V.** On lithium walls and the performance of magnetic fusion devices. — *Physics of Plasmas*, 2003, vol. 10, p. 1678; doi: 10.1063/1.1558293.
7. **Zakharov L.E., Blanchard W., Kaita R. et al.** Low recycling regime in ITER and the LiWall concept for its divertor. — *J. of Nuclear Materials*, 2007, vol. 363—365, pp. 453—457; doi: 10.1016/j.jnucmat.2007.01.230.
8. **Strachan J.D., Mansfield D.K., Bell M.G.** Wall conditioning experiments on TFTR using impurity pellet injection. — *J. of Nuclear Materials*, 1994, vol. 217, pp. 145—153; doi: org/10.1016/0022-3115(94)90314-X.
9. **Zakharov L.E.** On a burning plasma low recycling regime with PDT = 23—26 MW, QDT = 5—7 in a JET-like tokamak. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 096008; doi: 10.1088/1741-4326/ab246b.
10. **Zakharov L.E., Allain J.P., Bennett S.X. et al.** Low Recycling Divertor for JET Burning Plasma Regime (PDT > 25 MW, QDT > 5), Insensitive to Plasma Physics. — *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, vol. 48, pp. 1849—1856; doi: 10.1109/TPS.2019.2953591.
11. **Zakharov L.E.** Design Guidance for Flowing Lithium Systems in Tokamaks. Report at HT-7 Data Meeting and Workshop. July 19, 2011, ASIPP, Hefei, Anhui, China; doi: w3.pppl.gov/~zakharov.
12. **Yang Q.X., Zhao W.L., Wang Y.S. et al.** Design of flowing liquid lithium device for HT-7 tokamak. — *Fusion Eng. and Des.*, 2013, vol. 88, p. 1646—1649; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.107.
13. **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; doi: org/10.1088/1741-4326/aa7f41.
14. **Ono M., Jaworski M.A., Kaita R., NSTX-U contributions** Liquid lithium applications for solving challenging fusion reactor issues. — *Fusion Eng. and Des.*, 2017, vol. 117, pp. 124—129; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2016.06.060.
15. **Nygren R.E., Tabarés F.L.** Liquid surfaces for fusion plasma facing components — a critical review. Part I: Physics and PSI. — *Nuclear Materials and Energy*, 2016, vol. 9, pp. 6—21; doi: org/10.1016/j.nme.2016.08.008.
16. **Hu J.S., Zuo G.Z., Maingi R.** Experiments of continuously and stably flowing lithium limiter in EAST towards a solution for the power exhaust of future fusion devices. — *Nuclear Materials and Energy*, 2019, vol. 18, pp. 99—104; doi: org/10.1016/j.nme.2018.12.017.
17. **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; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2014.06.015.
18. **Miyazawa J., Goto T., Murase T. et al.** Conceptual design of a liquid metal limiter/divertor system for the FFHR-d1. — *Ibid.*, 2017, vol. 125, pp. 227—238; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.003.
19. **Smolentsev S., Rognlien T., Tillac M. et al.** Integrated Liquid Metal Flowing First Wall and Open-Surface Divertor for Fusion Nuclear Science Facility: Concept, Design, and Analysis. — *Fusion Science and Technology*, 2019, vol. 75, pp. 1—20; doi: 10.1080/15361055.2019.1610649.
20. **Nygren R.E., Rognlien T., Rensink M.E. et al.** A fusion reactor design with a liquid first wall and divertor. — *Fusion Eng. and Des.*, 2004, vol. 72, pp. 181—221; doi: 10.1016/j.fusengdes.2004.07.007.
21. **Goldston R.J., Hakim A., Hammett G.W. et al.** Recent advances towards a lithium vapor box divertor. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, pp. 1118—1121; doi: org/10.1016/j.nme.2017.03.020.
22. **Smolentsev S.** Design window for open-surface lithium divertor with helium-cooled substrate. — *Fusion Eng. and Des.*, 2021, vol. 173, p. 112930; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2021.112930.
23. **Emdee E.D., Goldston R.J.** Comparing lithium vapor box designs in a high heat flux scenario using SOLPS-ITER. — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 34, p. 101335; doi: org/10.1016/j.nme.2022.101335.
24. **Nagayama Y.** Liquid lithium divertor system for fusion reactor. — *Fusion Eng. and Des.*, 2009, vol. 84, pp. 1380—1383; doi: 10.1016/j.fusengdes.2009.02.002.
25. **Shpanskiy Yu.S., and the DEMO-FNS Project Team.** Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 076014; doi: org/10.1088/1741-4326/ab14a8.
26. **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, pp. 567—578; doi: 10.21883/JTF.2021.04.50619.259-20 (in Russian).
27. **Rindt P., Lopes Cardozo N.J., van Dommelen J.A.W. et al.** Conceptual design of a pre-loaded liquid lithium divertor target for NSTX-U. — *Fusion Eng. and Des.*, 2016, vol. 112, pp. 204—212; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2016.08.020.
28. **Jaworski M.A., Brooks A., Kaita R. et al.** Upgrades toward high-heat flux, liquid lithium plasma-facing components in the NSTX-U. — *Ibid.*, pp. 93—101; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2016.07.009.
29. **Mirnov S.V., Azizov E.A., Evtikhin V.A. et al.** Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2006, vol. 48, pp. 821—837; doi: org/10.1088/0741-3335/48/6/009.
30. **Mazzitelli G., Apicella M.L., Ridolfini V.P. et al.** Review of FTU results with the liquid lithium limiter. — *Fusion Eng. and Des.*, 2010, vol. 85, pp. 896—901; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2010.08.038.

31. **Lyublinski I., Vertkov A., Mirnov S., Lazarev V.** Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium. — *J. of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, pp. 1156—1159; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.017.
32. **Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Lyublinskiy I.E., Safronov V.A.** Comparative analysis of lithium first wall concepts for tokamak with reactor technologies. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2021, vol. 47, № 12, pp. 1130—1145; doi: 10.31857/S0367292121110251 (in Russian).
33. **Scholte J.G.A., Iafrati M., Lam S.S.H.** Reducing tin droplet ejection from capillary porous structures under hydrogen plasma exposure in Magnum-PSI. — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 34, p. 101315; doi: org/10.1016/j.nme.2022.101315.
34. **Oyarzabal E., Tabarés F.L., Liniers M. et al.** Comparative study of different Sn wetted W CPSs exposed to NBI fluxes in the OLMAT facility. — *Fusion Eng. and Des.*, 2023, vol. 190, p. 113711; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2023.113711.
35. **Kaita R., Majeski R., Boaz M. et al.** Effects of large area liquid lithium limiters on spherical torus plasmas. — *J. Nucl. Mater.*, 2005, vol. 337—339, pp. 872—876; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2004.10.019.
36. **Hu J.S., Sun Z., Guo H.Y. et al.** New steady-state quiescent high-confinement plasma in an experimental advanced superconducting tokamak. — *Phys. Rev. Lett.*, 2015, vol. 114, p. 055001; doi: 10.1103/PhysRevLett.114.055001.
37. **Maingi R., Boyle D., Canik J. et al.** The effect of progressively increasing lithium coatings on plasma discharge characteristics, transport, edge profiles and ELM stability in the National Spherical Torus Experiment. — *Nucl. Fusion*, 2012, vol. 52 (8), p. 083001; doi: org/10.1088/0029-5515/52/8/083001.
38. **Mansfield D.K., Hill K.W., Strachan J.D. et al.** Enhancement of Tokamak Fusion Test Reactor performance by lithium conditioning. — *Phys. Plasmas*, 1996, vol. 3, pp. 1892—1897; doi: org/10.1063/1.871984.
39. **Maan A., Boyle D.P., Majeski R. et al.** Improved neutral and plasma density control with increasing lithium wall coatings in the Lithium Tokamak Experiment- β (LTX- β). — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 35, p. 101408; doi: org/10.1016/j.nme.2023.101408.
40. **Baek S.G., Li M.H., Zhao H. et al.** Impact of lithium wall conditioning and wave-frequency on high density lower hybrid current drive experiment on EAST. — *Ibid.*, 2021, vol. 26, p. 100955; doi: org/10.1016/j.nme.2021.100955.
41. **Kaita R., Berzak L., Boyle D. et al.** Experiments with liquid metal walls: Status of the lithium tokamak experiment. — *Fusion Eng. and Des.*, 2010, vol. 85, pp. 874—881; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2010.04.005.
42. **Skinner C.H., Sullenberger R., Koel B.E. et al.** Plasma facing surface composition during NSTX Li experiments. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, pp. S647—S650; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.136.
43. **Schmitt J.C., Abrams T., Baylor L.R. et al.** Results and future plans of the Lithium Tokamak eXperiment (LTX). — *Ibid.*, pp. S1096—S1099; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.241.
44. **Hu J.S., Zuo G.Z., Ren J. et al.** First results of the use of a continuously flowing lithium limiter in high performance discharges in the EAST device. — *Nucl. Fusion*, 2016, vol. 56, p. 046011; doi: 10.1088/0029-5515/56/4/046011.
45. **Yang Q., Chen Z., Du Q.** Development of the flowing liquid lithium limiter for EAST tokamak. — *Fusion Eng. and Des.*, 2017, vol. 124, pp. 179—182; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2017.04.063.
46. **Zuo G.Z., Hu S., Maingi R. et al.** Mitigation of plasma-material interactions via passive Li efflux from the surface of a flowing liquid lithium limiter in EAST. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, p. 046017; doi: 10.1088/1741-4326/aa5ea0.
47. **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. — *Nuclear Fusion*, 2019, vol. 59, p. 016009; doi: 10.1088/1741-4326/aaedcb.
48. **Li C.L., Zuo G.Z., Maingi R. et al.** Development of a new TZM substrate flowing liquid lithium limiter for high performance plasma discharge in EAST. — *Fusion Eng. and Des.*, 2020, vol. 158, p. 111747; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2020.111747.
49. **Zuo G.Z., Li C.L., Maingi R. et al.** Effect of continuously flowing liquid Li limiter on particle and heat fluxes during H-mode discharges in EAST. — *Nuclear Materials and Energy*, 2022, vol. 33, p. 101263; doi: org/10.1016/j.nme.2022.101263.
50. **Xu W., Fiffis P., Szott M. et al.** Vertical flow in the Thermoelectric Liquid Metal Plasma Facing Structures (TELS) facility at Illinois. — *J. of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, pp. 1181—1185; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.045.
51. **Jaworski M.A., Morley N.B., Ruzic D.N.** Thermocapillary and thermoelectric effects in liquid lithium plasma facing components. — *Ibid.*, 2009, vol. 390—391, pp. 1055—1058; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.255.
52. **Majeski R., Kaita R., Boaz M. et al.** Testing of liquid lithium limiters in CDX-U. — *Fusion Eng. and Des.*, 2004, vol. 72 (1—3), pp. 121—132; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2004.07.002.
53. **Kessel C.E., Blanchard J.P., Davis A. et al.** Overview of the fusion nuclear science facility, a credible break-in step on the path to fusion energy. — *Ibid.*, 2018, vol. 135, pp. 236—270; doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.05.081.
54. **Smolentsev S., Rhodes T., Jiang Y. et al.** Status and progress of liquid metal thermofluids modelling for the US fusion nuclear science facility. — *Fusion Sci. Technol.*, 2021, vol. 77, pp. 1—16; doi: org/10.1080/15361055.2021.1906134.
55. **Kugel H.W., Bell M., Berzak L. et al.** Physics design requirements for the National Spherical Torus Experiment liquid lithium divertor. — *Fusion Eng. and Des.*, 2009, vol. 84, pp. 1125—1129; doi: 10.1016/j.fusengdes.2008.11.102.
56. **Rindt P., van den Eijnden J.L., Morgan T.W., Lopes Cardozo N.J.** Conceptual design of a liquid metal divertor for the European DEMO. — *Ibid.*, 2021, vol. 173, p. 112812; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2021.112812.
57. **Scholte J.G.A., Balden M., Brida D. et al.** Performance of a liquid Sn divertor target during ASDEX upgrade L-mode and H-mode operation. — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 37, p. 101522; doi: org/10.1016/j.nme.2023.101522.
58. **Marenkov E., Pshenov A., Kukushkin A.** Simulation of lithium flow, redeposition, and vapor shielding in liquid lithium divertor of T-15MD tokamak with SOLPS 4.3 code. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2022, vol. 64, p. 115006; doi: 10.1088/1361-6587/ac91a3.

59. **Krasilnikov A.V., Konovalov S.V., Bondarchuk E.N. et al.** Tokamak with reactor technologies (TRT): concept, missions, main features and expected characteristics. — *Fizika plazmy (Plasma Physics)*, 2021, vol. 47, pp. 970—985; doi: 10.31857/S0367292121110196 (in Russian).
60. **Albaneseet R., WPDTT2 Team, DTT Project Proposal Contributors.** DTT: a divertor tokamak test facility for the study of the power exhaust issues in view of DEMO. — *Nucl. Fusion*, 2017, vol. 57, p. 016010; doi: 10.1088/0029-5515/57/1/016010.
61. **Ambrosino R.** Divertor Tokamak Test facility: a testbed for DEMO. — *Fusion Eng. and Des.*, 2021, vol. 167, p. 112330; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2021.112330.
62. **Chandrasekhar S.** Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. — New York: Dover, 1961. 652 p.
63. **Sun Z., Hu J.S., Zuo G.Z. et al.** Development of and experiments with liquid lithium limiters on HT-7. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, pp. S899—S904; doi: org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.195.
64. **Whyte D.G., Evans T.E., Wong C.P.C. et al.** Experimental observations of lithium as a plasma-facing surface in the DIII-D tokamak divertor. — *Fusion Eng. and Des.*, 2004, vol. 72, pp. 133—147; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2004.07.014.
65. **Tang Z.L., Zuo G.Z., Li C.L.** Lithium splashing from flowing liquid lithium limiter and its effect on high confinement plasma performance in EAST tokamak. — *Nuclear Materials and Energy*, 2020, vol. 25, p. 100845; doi: org/10.1016/j.nme.2020.100845.
66. **Yang J.C., Liu B.Q., Huang Y.F. et al.** Experimental investigation of the flowing lithium limiter. Part 1. The spreading characteristics of lithium on solid substrate without an external magnetic field. — *Fusion Eng. and Des.*, 2023, vol. 189, p. 113489; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2023.113489.
67. **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; doi: iopscience.iop.org/0029-5515/55/12/123013).
68. **Abrams T., Jaworski M.A., Kaita R. et al.** Erosion of lithium coatings on TZM molybdenum and graphite during high-flux plasma. — *Fusion Eng. and Des.*, 2014, vol. 89, pp. 2857—2863; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2014.06.005.
69. **Fiflis P., Press A., Xu W. et al.** Wetting properties of liquid lithium on select fusion relevant surfaces. — *Ibid.*, pp. 2827—2832; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.060.
70. **Zuo G.Z., Ren J., Meng X.C. et al.** Investigation of wettability of Li on 316L SS surface and interfacial interactions for fusion device. — *Ibid.*, 2018, vol. 137, pp. 420—426; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2018.10.023.
71. **Kapat A., Allain J.P., Bedoya F., Woller K.B.** Liquid lithium wetting and percolation in a porous tungsten/liquid Li plasma facing component (PFC). — *Ibid.*, 2022, vol. 178, p. 113087; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2022.113087.
72. **Wang J., Wang H., Xie J. et al.** Fundamental study on the wetting property of liquid lithium. — *Energy Storage Materials*, 2018, vol. 14, pp. 345—350; doi: org/10.1016/j.ensm.2018.05.021.
73. **Ruzic D.N., Szott M., Sandoval C. et al.** Flowing liquid lithium plasma-facing components — physics, technology and system analysis of the LiMIT system. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, pp. 1324—1329; doi: org/10.1016/j.nme.2017.06.001.
74. **Jaworski M.A., Lau C.Y., David L.** Observations of liquid lithium uptake in a porous molybdenum foam. — *J. of Nuclear Materials*, 2008, vol. 378, pp. 105—109; doi: 10.1016/j.jnucmat.2008.05.005.
75. **Krat S., Selivanov R., Sorokin I. et al.** First study of lithium boron composite as plasma facing material. — *Nuclear Materials and Energy*, 2023, vol. 35, p. 101423; doi: 10.1016/j.nme.2023.101423.
76. **Lang E., Kapat A., Allain J.P.** Deciphering surface behavior and deuterium retention in tin-lithium-coated fuzzy tungsten substrates. — *Ibid.*, 2017, vol. 12, pp. 1352—1357; doi: 10.1016/J.NME.2017.07.001.
77. **Lopez Pérez C., Marchhart T., Marin A. et al.** Liquid lithium wettability studies on novel zirconium-alloyed porous tungsten. — *Ibid.*, vol. 37, p. 101525; doi: org/10.1016/j.nme.2023.101525.
78. **Budaev V.P., Lyubliński I.E., Fedorovich S.D. et al.** Impact of liquid metal surface on plasma-surface interaction in experiments with lithium and tin capillary porous systems. — *Ibid.*, 2020, vol. 25, p. 100834; doi: org/10.1016/j.nme.2020.100834.
79. **Kugel H.W., Allain J.P., Bell M.G. et al.** NSTX plasma operation with liquid lithium divertor. — *Fusion Eng. and Des.*, 2012, vol. 87, pp. 1724—1731; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2011.07.010.
80. **Dejarnac R., Horacek J., Hron M.** Overview of power exhaust experiments in the COMPASS divertor with liquid metals. — *Nuclear Materials and Energy*, 2020, vol. 25, p. 100801; doi: org/10.1016/j.nme.2020.100801.
81. **Rindt P., Mata Gonzalez J., Hoogerhuis P. et al.** Using 3D-printed tungsten to optimize liquid metal divertor targets for flow and thermal stresses. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 054001; doi: 10.1088/1741-4326/ab0a76.
82. **Szott M., Ruzic D.N.** 2-D moving mesh modeling of lithium dryout in open surface liquid metal flow applications. — *Fusion Eng. and Des.*, 2020, vol. 154, p. 111512; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2020.111512.
83. **Piskarev P.Yu., Mazul I.V., Zakharov L.E.** Fabrication and thermal tests of SS/Cu bimetal plate for the use in the concept of flowing liquid lithium layer in tokamak limiters and divertors. — *Ibid.*, 2022, vol. 184, p. 113313; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2022.113313.
84. **Taylor C.N., Luitjohan K.E., Heim B. et al.** Surface chemistry analysis of lithium conditioned NSTX graphite tiles correlated to plasma performance. — *Ibid.*, 2013, vol. 88, pp. 3157—3164; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2013.09.007.
85. **Meng X., Zuo G., Sun Z. et al.** Compatibility of molybdenum, tungsten, and 304 stainless steel in static liquid lithium under high vacuum. — *Plasma Phys. Rep.*, 2018, vol. 44, pp. 671—677; doi: 10.1134/S1063780X18070036.
86. **Moynihan C.D., Stemmley S., Moore B.** Characterization of liquid lithium corrosion for fusion reactor materials. — *Fusion Eng. and Des.*, 2024, vol. 199, p. 114102; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2023.114102.
87. **Xu W., Curreli D., Ruzic D.N.** Computational studies of thermoelectric MHD driven liquid lithium flow in metal trenches. — *Ibid.*, 2014, vol. 89, p. 114102; doi: org/10.1016/j.fusengdes.2014.06.008.

88. **Meng X.C., Li L., Li C.L. et al.** Corrosion characteristics of Mo and TZM alloy for plasma facing components in molten lithium at 623 K. — *Corrosion Sci.*, 2022, vol. 200, p. 110202; doi: [org/10.1016/j.corsci.2022.110202](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110202).

AUTHORS

Pisarev A.A. National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; aapisarev@mephi.ru

Vertkov A.V. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; avertkov@yandex.ru

Zharkov M.Yu. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia

Mazul I.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; mazul@sintez.niiefa.spb.su

Piskarev P.Yu. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; piskarev@sintez.niiefa.spb.su

Tarasyuk G.M. National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Received 25 December 2023

Revised 15 January 2024

Accepted 17 January 2024

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2024, vol. 47, issue 1, pp. 15—28