

УДК 533.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ЛИТИЕВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ДЛЯ ТОКАМАКА РЕАКТОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2021 г. А. В. Вертков^{a, b}, М. Ю. Жарков^{a, b}, И. Е. Люблинский^{a, b, c, *}, В. А. Сафронов^b

^a АО “Красная Звезда”, Москва, Россия

^b Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”, “Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия

^c Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

* e-mail: IELyublinskiy@redstaratom.ru

Поступила в редакцию 09.04.2021 г.

После доработки 25.05.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Нерешенным вопросом при разработке стационарного термоядерного реактора является конструкция его внутрикамерных элементов, обращенных к плазме. В настоящее время стало очевидным, что среди материалов, традиционно используемых для внутрикамерных элементов, нет твердых конструкционных материалов, которые бы отвечали требованиям длительной эксплуатации под воздействием потока термоядерных нейтронов (14 МэВ) с плотностью $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и теплового потока с плотностью 10–20 МВт/м². Альтернативным решением этой проблемы является использование жидких металлов в качестве материала, обращенного к плазме, и, в первую очередь лития, имеющего малый атомный номер (низкое зарядовое число Z). Рассматриваются и другие легкоплавкие металлы с высоким Z , но более низким, чем у лития, давлением пара. Это позволит создать долговечную, неповрежденную и самообновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов, которая не оказывает загрязняющего воздействия на плазму. Сформулировать основные идеи альтернативной концепции внутрикамерных элементов можно на основе всестороннего анализа проблем и требований, возникающих при разработке внутрикамерных элементов стационарного реактора, например, реактора типа ДЕМО. В статье представлен анализ возможной конструкции литиевых внутрикамерных элементов и обсуждаются основные идеи концепции литиевой первой стенки токамака реакторных технологий.

Ключевые слова: литий, жидкие металлы, дивертор, лимитер, первая стенка

DOI: 10.31857/S0367292121110251

1. ВВЕДЕНИЕ

Нерешенным вопросом при разработке стационарного термоядерного реактора является конструкция его внутрикамерных элементов (ВЭ), обращенных к плазме. В настоящее время стало очевидным, что среди материалов, традиционно используемых для ВЭ, нет твердых конструкционных материалов, которые бы отвечали требованиям длительной эксплуатации под воздействием потока термоядерных нейтронов (14 МэВ) с плотностью $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и теплового потока с плотностью 10–20 МВт/м².

Альтернативным решением этой проблемы является использование жидких металлов (ЖМ) в качестве материала, обращенного к плазме, и, в первую очередь лития, имеющего малый атомный номер (низкое зарядовое число Z). Рассматриваются и другие легкоплавкие металлы с высоким Z , но более низким, чем у лития, давлением

насыщенных паров. Это позволит создать долговечную, неповрежденную и самообновляющуюся поверхность ВЭ, которая не оказывает загрязняющего воздействия на плазму.

Сформулировать основные идеи альтернативной концепции ВЭ можно на основе всестороннего анализа проблем и требований, возникающих при разработке ВЭ стационарного реактора, например, реактора типа ДЕМО [1, 2]. Необходимо также учитывать современный опыт и достижения в области проектирования, материаловедения и технологии конструкционных материалов, особенностей применения ЖМ в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы [3–8]. В статье представлен анализ возможной конструкции литиевых ВЭ и обсуждаются основные идеи концепции литиевой первой стенки токамака реакторных технологий (TRT) [9].

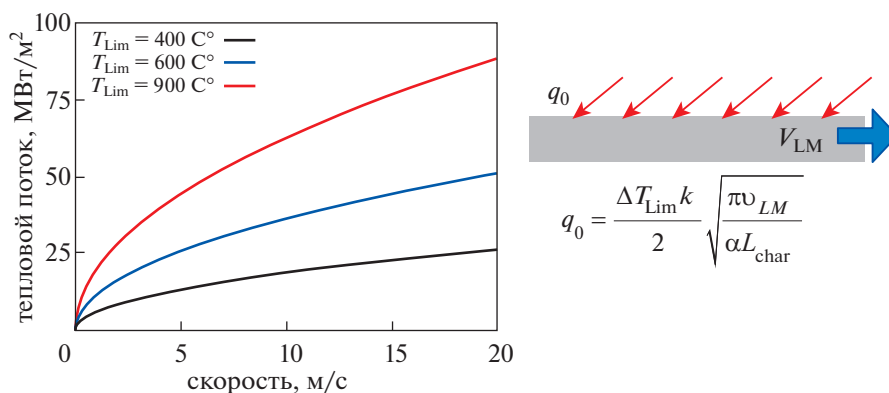


Рис. 1. Результаты расчета зависимости величины отводимого теплового потока от скорости потока ЖМ при температуре поверхности $T_{Lim} = 400, 600, 900\text{C}^\circ$.

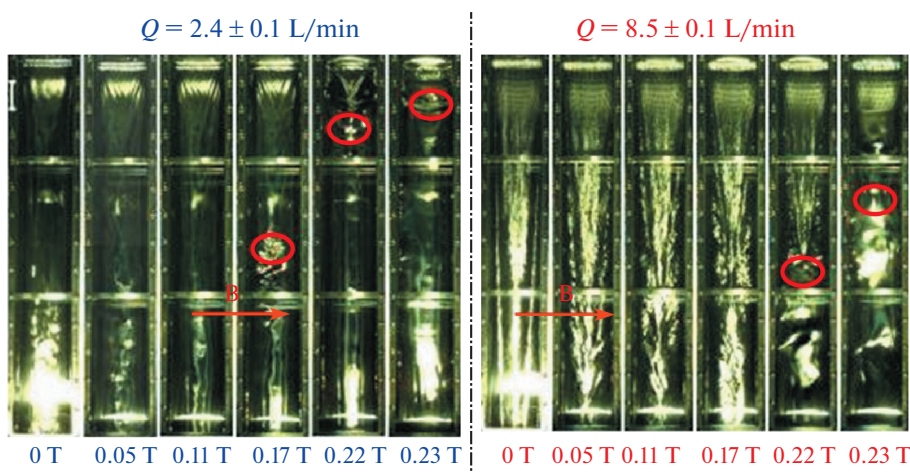


Рис. 2. Поток жидкого лития в поперечном магнитном поле экспериментального стенда. Овалом выделены места остановки потока [10].

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕПЦИЙ ДЛЯ ЛИТИЕВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ TRT

Наиболее важным моментом, от которого зависит существо концепции, является выбор схемы использования ЖМ. Существуют четыре основных подхода к защите ВЭ с помощью ЖМ: толстая быстротекущая пленка; тонкая медленно текущая пленка; медленная текущая пленка через капиллярно-пористую систему (КПС) и паровая защита. Принципиально важно, чтобы концепция имела перспективу для использования в стационарном токамаке-реакторе. Поэтому в данном обзоре не рассматривается подробно существующее разнообразие схем, пригодных лишь для экспериментальных физических установок.

Первый подход, предложенный в США, предполагает обеспечение отвода тепла и частиц за счет потока толстого слоя (более 1 см) ЖМ по по-

верхности ВЭ. Однако для выполнения заявленных функций требуется высокая скорость потока ЖМ (более 10 м/с) при тепловом потоке из плазмы до 10 МВт/м² (рис. 1). Высокое МГД-сопротивление течению ЖМ в магнитном поле не позволяет реализовать такой подход. Как было показано экспериментально (рис. 2) [10], поток лития со скоростью $0.3\text{--}1.2\text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ останавливается при поперечном магнитном поле 0.2–0.3 Тл. Кроме того, трудно организовать равномерное покрытие поверхности ВЭ и обеспечить необходимое сопротивление разбрызгиванию под действием МГД-сил. Под влиянием непреодолимых проблем развитие этого направления было приостановлено.

Вторая концепция, интенсивно развиваемая сейчас в США и под их влиянием в КНР, заключается в организации медленного течения тонкой пленки ЖМ на поверхности ВЭ для защиты и

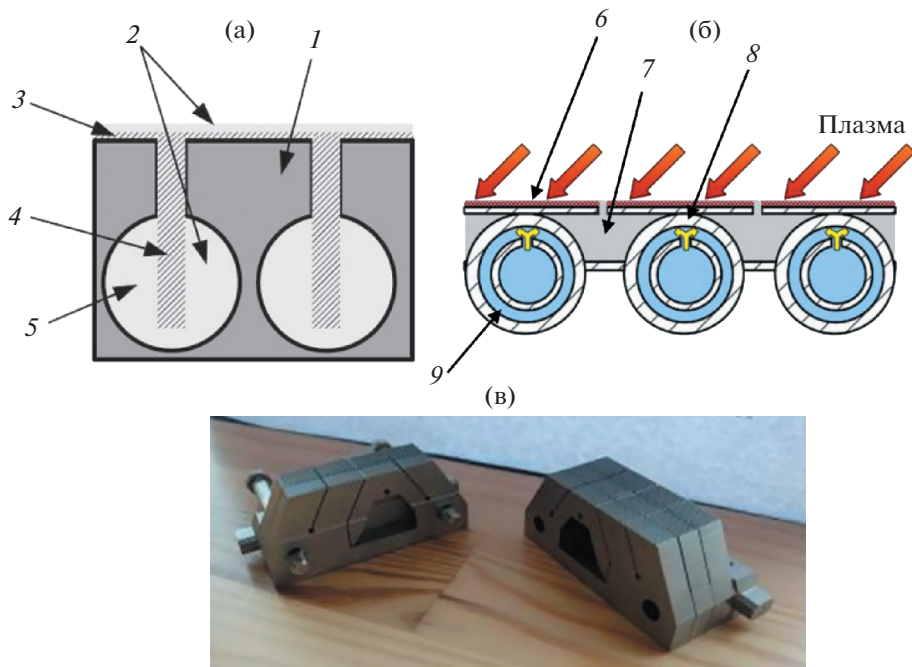


Рис. 3. Схема и модель ВЭ с ЖМ токамака NSTX-U: схема с подпиткой с помощью КПС без активного охлаждения (а); модель ВЭ для испытания на установке Pilot-PSI (б); схема Т-образного ВЭ стационарного токамака-реактора ДЕ-МО с активным охлаждением (в). На рисунке цифрами обозначены: 1 – подложка ВЭ, 2 – жидкий металл, 3 – текстурированная поверхность, 4 – внутренняя капиллярная структура, 5 – внутренний резервуар, 6 – пористая или текстурированная поверхность, 7 – жидкий литий, 8 – конструкционный материал (например, сталь F82H), 9 – хладагент (например, гелий).

самообновления. Отвод тепла обеспечивается теплопроводностью через конструкцию ВЭ к протекающему теплоносителю [11]. В этом случае стабилизация температуры поверхности сильно зависит от конструкции, материалов ВЭ и свойств охлаждающей жидкости. Основными проблемами для такой концепции являются достижение равномерного покрытия пленкой ЖМ поверхности ВЭ и разбрызгивание под действием МГД-сил. В решении этих проблем разработчикам пришлось использовать российский подход с использованием капиллярного эффекта. В США подпитку и распределение ЖМ по поверхности ВЭ стараются осуществить за счет каналов миллиметрового размера, нанесенных на поверхность конструкции (бороздки). В КНР в дополнение к этому применяют тканую сетку. Примером реализации такого подхода является разработка ВЭ для токамака NSTX-U (рис. 3) и EAST (рис. 4). Как показывают эксперименты (рис. 5) [12], относительно положительный результат по равномерному распределению потока ЖМ по поверхности достигается только при использовании капиллярного эффекта (нанесение мелких царапин, канавок или сетки, нанесение пористого порошкового слоя).

Третья концепция, разрабатываемая в нашей стране, на основе неподвижного или медленно

протекающего ЖМ заключенного в пористую структуру КПС [13] выглядит как наиболее успешное решение для защиты поверхности ВЭ. Эта концепция интегрирует все преимущества ЖМ с возможностью равномерного распределения слоя ЖМ на поверхности ВЭ независимо от ее ориентации в пространстве при высоком сопротивлении разбрызгиванию. Отвод тепла обеспечивается за счет теплопроводности через структуру ВЭ к проточному теплоносителю. Таким образом, способность ВЭ на основе КПС выдерживать тепловые потоки высокой удельной плотности сильно зависит от конструкции, конструкционных материалов и охлаждающей жидкости.

Первые эксперименты, проведенные нами с текущим по панели с КПС литием [14], подтверждают реализуемость разрабатываемой концепции.

Вторая и третья концепции достаточно близки. В перспективе они могут объединиться поскольку решение критических проблем опирается на применение капиллярного эффекта с помощью КПС.

Исходя из существующих аналитических обзоров и собственного опыта [3–8, 15], наиболее целесообразной схемой является использование медленного дрейфа жидкого металла по пористой

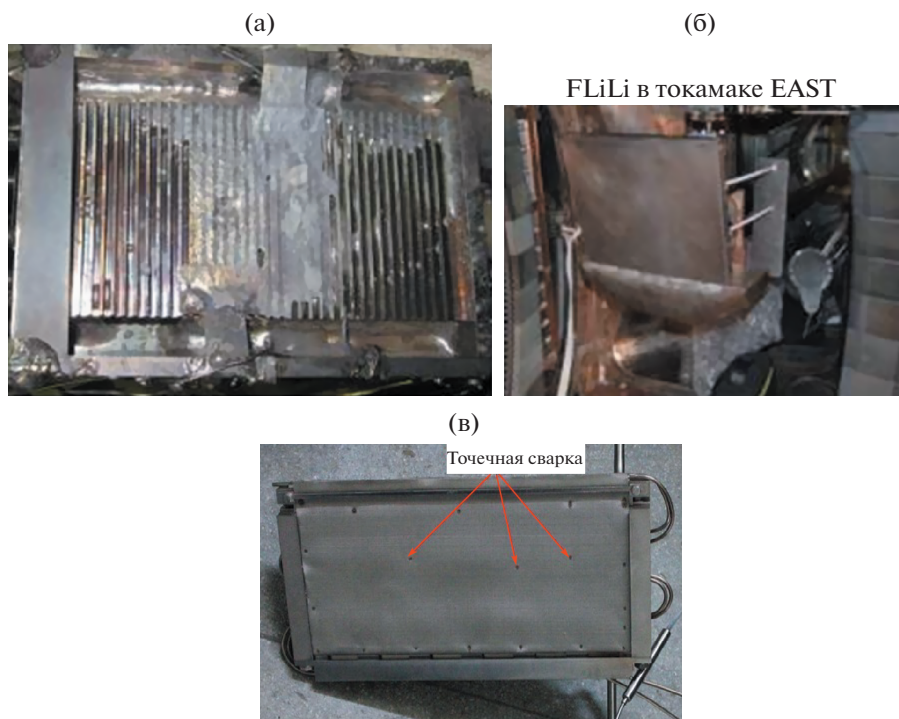


Рис. 4. Лимитер с текущим литием токамака EAST: лимитер с прокачкой ЖМ по каналам за счет термоэлектрического эффекта (а); лимитер с прокачкой ЖМ ЭМ насосом и распределением лития с помощью КПС, охлаждение теплоносителем (б, в).



Рис. 5. Вид поверхности литиевого лимитера LLL токамака EAST. Скорость потока лития $V_{Li} = 1$ см/с (эксперименты 2016 г.): гладкая поверхность (а); капиллярные бороздки перпендикулярные направлению потока (б) [12].

поверхности КПС или непосредственно в ее структуре. Данная схема позволяет осуществлять самообновление поверхности ВЭ любой формы и ориентации, стабилизацию ЖМ под действием электромагнитных сил за счет капиллярных сил в КПС. Медленно протекающий под действием силы тяжести ЖМ (не более нескольких миллиметров в секунду) позволит удалить захваченный тритий и накопленные примеси. Причем нет необходимости осуществлять постоянную “пролив-

ку” ЖМ. Эта операция может проводиться периодически по достижении заданной концентрации трития в литии или при возникновении необходимости подпитать поверхность ЖМ и удалить осевшие загрязнения. Концепция одинаково подходит для использования любого жидкого металла. В этом случае тепловая энергия, поступающая от плазмы к поверхности, отводится через структуру ВЭ к протекающему теплоносителю. В качестве материала КПС предполагается исполь-

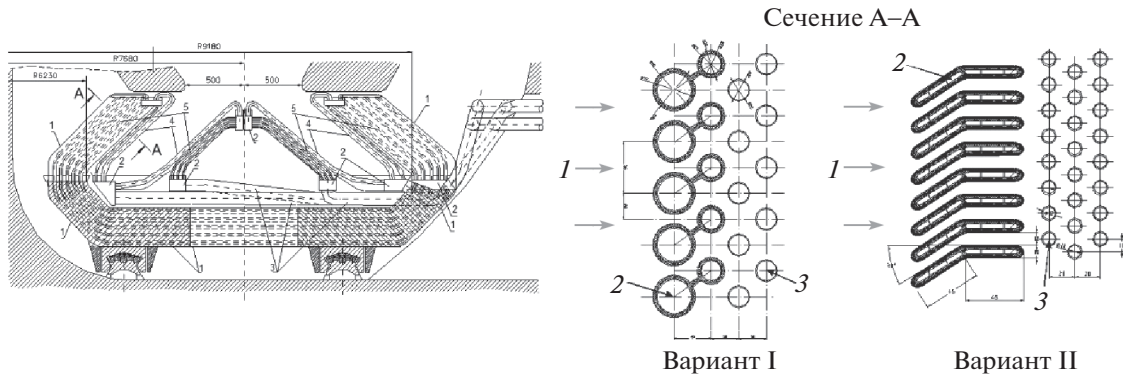


Рис. 6. Схема возможной конструкции жидкометаллического литиевого дивертора токамака-реактора [16, 17]. На рисунке цифрами обозначены: 1 – поток энергии, 2 – каналы зоны испарения лития, 3 – каналы зоны конденсации лития.

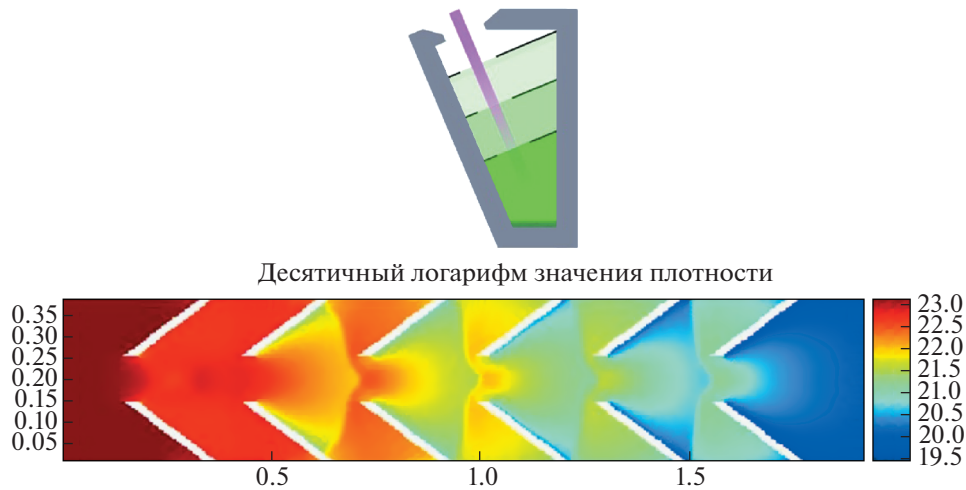


Рис. 7. Схема литиевого дивертора (а) и распределение потока пара лития в канале дивертора (б) для концепции ЖМ дивертора реактора ДЕМО типа “паровой ящик” (“дно ящика слева”) [18].

зование хорошо зарекомендовавшего себя пористого материала на основе металлических волокон, свойства которого описаны в [15].

Отдельным направлением применения ЖМ в токамаках являются концепции, основанные на принципе газовой / паровой мишени [16–18]. В этих концепциях (см. рис. 6, 7) защита приемных элементов дивертора осуществляется за счет высокой скрытой теплоты парообразования ЖМ (лития). В начальный момент входящая энергия плазмы расходуется на испарение ЖМ с поверхности приемной пластины и перераспределяется на большую поверхность стенок канала дивертора при его конденсации. Тем самым обеспечиваются щадящие условия отвода тепла через стенки канала к теплоносителю. Помимо этого, испарившийся ЖМ создает плотное облако пара ЖМ над поверхностью приемной пластины, ко-

торое играет роль “паровой” мишени. В объеме такой мишени происходит переизлучение части энергии входящей плазмы. Переизлученная энергия в виде фотонов перераспределяется по поверхности стенок канала. Поскольку поверхность канала в разы больше поверхности приемной пластины, то падающий на стенки тепловой потоккратно снижается. При обеспечении соответствующих условий в диверторе может возникнуть режим с оторванной плазмой. Возможность реализации подобного механизма защиты продемонстрирована в экспериментах с ЖМ мишенью на установке Pilot-PSI [19].

Концепция защиты ВЭ на основе переизлучения (некоронального излучения) большей части энергии частиц плазмы, выходящих в SOL, на атомах лития предложена в работе [20]. Литий поступает в SOL за счет испарения/распыления с

Таблица 1. Температурный предел совместимости конструкционных материалов с ЖМ

Конструкционный материал	Температурный предел, °С		
	Li	Sn / Sn-Li сплав	Ga
Ферритная / ферритно-мартенситная хромистая сталь	800	<400	<400
Аустенитная Cr-Ni сталь	700	<400	<400
V и V-Cr-Ti сплавы	900	<700	<700
Mo и сплавы	1200	1000	<700
W и сплавы	1500	1200	700–900
Cu и сплавы	>180	>230	>150

поверхности литиевого лимитера, размещенного в области плазмы вне последней замкнутой магнитной поверхности. Выходящие на поверхность первой стенки камеры токамака ионы лития перехватываются коллекторами, находящимися в тени лимитера — источника лития. Таким образом осуществляется снижение величины тепловых потоков из плазмы, выходящих на ВЭ и организуется замкнутый цикл циркуляции лития в камере токамака без его неконтролируемого накопления.

Концепция ЖМ ВЭ для стационарного токамака-реактора типа ДЕМО подробно рассмотрена в [21].

Кроме лития в настоящее время активно рассматриваются как ЖМ для использования в термоядерном реакторе галлий, олово и сплав олово-литий [3–5]. Окончательный выбор ЖМ может быть сделан только на основании следующих критериев отбора: имеющийся опыт использования в условиях токамака, наличие отработанной технологии применения, совместимость с конструкционными материалами ВЭ, физико-химические свойства, активизируемость [21–26].

Считается, что верхний температурный предел применимости ЖМ определяется допустимым потоком его испаренных или распыленных атомов в плазму. Для лития и олова он составляет ~500 и ~1000°С соответственно, но с учетом механизма переосаждения он может достигать ~700 и 1250°С соответственно [26]. Для сплава Li–Sn давление насыщенных паров лития над расплавом более чем на три порядка ниже соответствующих давлений паров для чистого Li [27]. Для олова испарение не наблюдается при температуре <1000°С. [28]. По этой причине применение сплавов Sn–Li выглядит предпочтительнее с точки зрения более высокой допустимой температуры использования в ВЭ.

Пределы рабочих температур, определяемые по совместимости ЖМ с конструкционными материалами ВЭ и КПС [29], приведены в табл. 1.

Как видно, галлий является наиболее агрессивным среди предложенных ЖМ и может быть

исключен из рассмотрения. Указанные температурные пределы должны учитываться при проектировании ВЭ, выборе конструкционного материала и определении допустимого теплового потока. По этим причинам литий можно рассматривать как наиболее предпочтительный ЖМ. Во всех рассмотренных концепциях смачиваемость конструкционных материалов ЖМ является критическим аспектом. Угол смачивания лития и олова для выбранных конструкционных материалов составляет ~0° и 20–30° соответственно. Проблема со смачиванием металлов оловом является нетривиальной и разработка технологии смачивания в этом случае совершенно необходима. Для сплава Li–Sn эта проблема не столь критична, поскольку присутствие лития приводит к его более высокой химической реакционной активности по отношению к оксидным слоям на поверхности твердого конструкционного материала. Тем не менее технология смачивания сплавом Li–Sn конструкционных материалов ВЭ требует дальнейшей проработки.

Из соображений безопасности общее количество лития в камере реактора не должно превышать определенного предела, который определяется исходя из предельно возможного давления водорода в камере (0.2 МПа), возникающего в результате химической реакции общего количества лития с водой [30]. Расчетное количество лития в диверторе реактора типа ДЕМО на основе литиевых КПС при предполагаемой площади приемных пластин ~66 м², толщине КПС равной 0.5 мм и пористости КПС равной 40% составит ~13 л (~6.5 кг), что соответствует требованиям безопасности. Эта проблема не возникает, когда применяются сплавы Li–Sn.

Поскольку литий является активным поглотителем водорода, возникает проблема захвата и накопления радиоактивного трития в камере токамака-реактора. Для ДЕМО предел допустимого количества захваченного трития не должен превышать 1 кг [30]. Однако, принимая во внимание, что равновесное давление системы Li–H при 600°С составляет 270 Па, а максимальное давление в диверторе может быть выше этой величины,

то для предотвращения образования тритидов или дейтеридов лития необходима организация рециркуляции лития для снижения концентрации изотопов водорода в растворе жидкого металла ниже критической величины их образования. Для сплава Li–Sn этот аспект не критичен и не нуждается в каких-либо специальных мерах. Таким образом, реализованная скорость обновления лития в диверторе не позволяет образовывать гидрид/тритид лития, а общее количество захватываемого трития в камере значительно ниже предельно допустимого значения. Для сплава Sn и Li–Sn этот аспект не критичен и не нуждается в каких-либо специальных мерах.

Сравнивая стабильность агрегатного состояния и состава рассматриваемых ЖМ, необходимо отметить, что чистые металлы, такие как Li и Sn, являются стабильными в отличие от сплава Li–Sn.

Для сплава Li–Sn возможно изменение концентрации лития вследствие его испарения при эксплуатации ВЭ. Это может приводить к тому, что сплав, находящийся в высокотемпературной области ВЭ, со временем обедняется по содержанию лития и необходимый для кондиционирования плазмы поток лития заметно снижается. Наиболее критическим результатом перераспределения лития является возможное образование на поверхности холодной зоны ВЭ тугоплавких соединений (интерметаллидов с температурой плавления $\sim 700\text{--}800^\circ\text{C}$) вследствие осаждения лития и роста его концентрации на поверхности. Кроме прочего, температура плавления сплава Li–Sn выше по сравнению с чистыми литием и оловом. Для считающегося перспективным сплава 75 ат. % Sn + 25 ат. % Li температура плавления составляет около 350°C . В интервале температур $222\text{--}350^\circ\text{C}$ расплав не является однофазным. В жидком расплаве с низкой концентрацией лития присутствует твердая фаза, обогащенная литием – Li_2Sn_5 . Таким образом, применение сплава Li–Sn в качестве материала, обращенного к плазме, находится под сомнением.

Исходя из вышеизложенного, чистый литий является наиболее предпочтительными жидким металлом для реализации концепции ЖМ ВЭ токамака-реактора.

3. ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВЭ

Отметим, что с точки зрения активации и влияния радиационного повреждения на свойства конструкционных материалов в условиях ДЕМО приемлемыми считаются такие материалы, как хромистые нержавеющие стали, ванадиевые сплавы и вольфрамовые сплавы. Медные сплавы

могут применяться только в очень ограниченном количестве. При анализе следует учитывать возможную реальную конструкцию ВЭ и наличие доступных технологий их изготовления. Например, трудно предположить реальный ВЭ токамака, целиком состоящий из вольфрама или его сплавов. Вольфрам может быть успешно использован в виде волокнистого материала основы КПС или защитных пластин ВЭ. Таким образом, хромистые стали и ванадиевые сплавы можно рассматривать как основные структурные материалы ВЭ. С этих позиций температурный порог для использования лития или олова в реальной конструкции ВЭ определяется самым низким порогом для материала, контактирующего с ЖМ. В этом случае контакт меди и ее сплавов с ЖМ недопустим по крайней мере без применения защитных покрытий. Таким образом, температурный порог (см. табл. 1) для использования лития в ВЭ, содержащих стальные элементы, составляет 800 и 900°C для ВЭ с ванадием. Для олова этот предел не превышает 400°C для стальных конструкций и 700°C для ванадиевых. Таким образом, при использовании лития приемлемой температурой поверхности ВЭ можно считать 700°C (с учетом ограничения по допустимому потоку лития в плазму). Для олова допустимая температура поверхности (контакт только с W) составляет около 1000°C . Однако для областей конструкции ВЭ, где ЖМ контактируют со сталью и ванадиевым сплавом он составляет лишь 400 и 700°C соответственно.

Учитывая влияние нейтронного облучения (радиационное повреждение до 5 сна/год) на свойства конструкционных материалов дивертора, допустимый температурный диапазон их использования в конструкции ВЭ составляет [2]: для стали типа Eurofer – $350\text{--}550^\circ\text{C}$; для сплава V–Cr–Ti – $400\text{--}700^\circ\text{C}$; для Cu – $200\text{--}350^\circ\text{C}$; для сплавов W – более 650°C . Это означает, что при разработке конструкции ВЭ применяемые материалы должны размещаться в зонах конструкции ВЭ с допустимыми температурами. Таким образом, исходя из предела совместимости с ЖМ (табл. 1), тепловых свойств материала и критерия прочности (SDC-IC) можно оценить максимально допустимый тепловой поток на поверхности ВЭ для рассматриваемых материалов (табл. 2).

Из анализа приведенных в табл. 2 данных следует, что только вольфрам соответствует требованиям по стационарной работе ВЭ при потоках $10\text{--}20$ МВт/м². Следовательно, для создания реальных конструкций ВЭ необходимо разработать новый конструкционный материал для принимающей поверхности ВЭ с высокими прочностными и теплофизическими свойствами.

Предложен новый композитный материал, состоящий из 3-мерной пористой структуры на ос-

Таблица 2. Предельный тепловой поток на поверхность конструкционных материалов ВЭ*

Материал	Тепловой поток, МВт/м ²
Ферритная / ферритно-мартенситная хромистая сталь	3.5
V-Cr-Ti сплав	9.5
Композит 67% вольфрам + 33% хромистая ферритная сталь	21
W и сплавы	48

*толщина стенки 1 мм + 0.5 мм КПС с литием, температура поверхности ВЭ 650°C.

нове вольфрамового волокна заполненной ферритной сталью. Вид образца прототипа такого композиционного материала (67% вольфрамового волокна + 33% чистого железа) представлен на рис. 8. Как показали проведенные расчеты, оптимальной по составу и свойствам является композиция 67% вольфрамового волокна + 33% стали. Ожидаемые свойства композита, полученные из расчетных оценок представлены в табл. 3.

Кроме того, предлагаемый композиционный материал может быть достаточно технологичным и иметь хорошую свариваемость с другими элементами ВЭ, выполненными из стали типа Русфер (Еврофер). Для подтверждения этого предположения необходимо будет изготовить и исследовать такой материал. Первые образцы модельного композиционного материала в настоящее время уже получены пропиткой пористого мата из вольфрамовой проволоки железом высокой чистоты. Начаты исследования их механических и теплофизических свойств. На рис. 8 при-

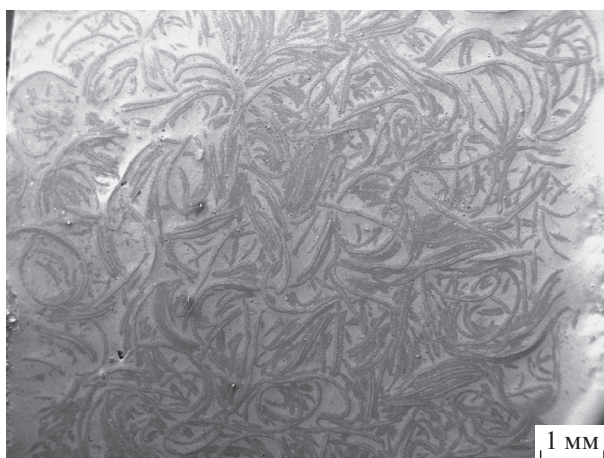


Рис. 8. Внешний вид поверхности композита 67% W + 33% Fe.

Таблица 3. Расчетные свойства композита 67% вольфрамовое волокно + 33% сталь

Свойство	Величина
Теплопроводность, Вт/м·К	91
Предел текучести, МПа	1060
Предел прочности, МПа	1180
Модуль упругости, ГПа	327
Коэффициент Пуассона	0.36
Коэффициент теплового расширения, 1/К	6.6×10^{-6}

веден внешний вид поверхности полученного композита.

Выбор основного материала КПС является очень важным аспектом концепции ВЭ. Волокнистые пористые материалы являются оптимальным решением с точки зрения механических свойств, стойкости к термоударам и радиационному воздействию. Более того, не спеченные материалы, такие как проволочная сетка, войлок и “металлическая резина”, имеют явное преимущество в гибкости, ударной прочности и релаксации напряжений. С учетом коррозионной стойкости и теплофизических свойств предпочтительным является КПС на основе пористого материала из W волокна.

Обычно структура КПС состоит из двух слоев. Поверхностный слой определяет капиллярные свойства КПС. Малый размер пор КПС обеспечивает высокое капиллярное давление и повышенную стабильность ЖМ на поверхности ВЭ. Радиус пор для реальной структуры КПС токамака обычно составляет 10–30 мкм, что соответствует $4-7 \times 10^4$ Па для олова и $2.5-5 \times 10^4$ Па для лития (рис. 9). Такие поры обеспечивают достаточный капиллярный подъем ЖМ для обеспечения эффективного обновления поверхности ВЭ.

Структура поверхности КПС должна удовлетворять следующему неравенству для обеспечения функциональности в условиях токамака [22]:

$$P_C \geq \Delta P_L + \Delta P_G + \Delta P_F + \Delta P_{MHD}, \quad (1)$$

где P_C – капиллярное давление, ΔP_L – гидравлическое падение давления, ΔP_G – гидростатическое падение давления, ΔP_F – падение давления на испаряющейся поверхности за счет фазового перехода жидкость–пар, ΔP_{MHD} – падение давления за счет МГД-эффекта в магнитном поле. Компоненты неравенства могут быть оценены следующим образом: $\Delta P_L = (8m\mu L_{CPS}) / (S_{CPS}\epsilon R_{eff}^2 \gamma)$, где m – скорость испарения, μ – динамическая вязкость лития, L_{CPS} – размер КПС вдоль потока ЖМ, S_{CPS} – площадь поперечного сечения КПС, ϵ – объемная пористость, R_{eff} – эффективный радиус

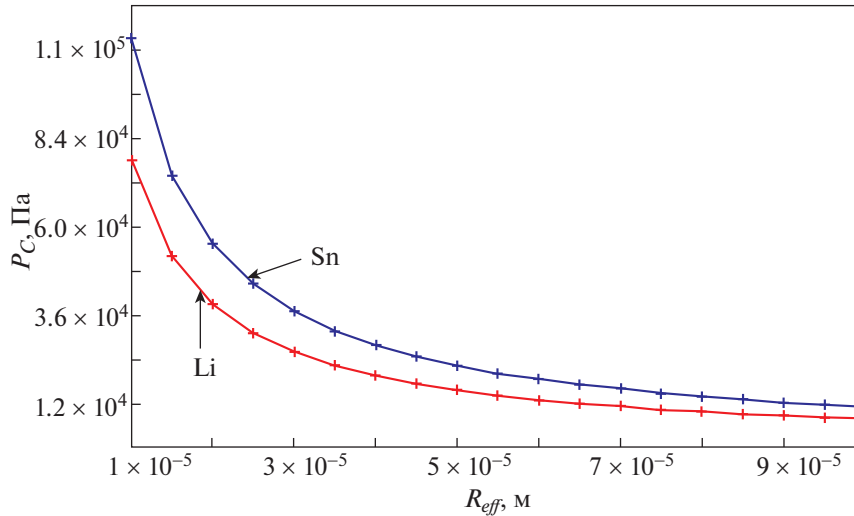


Рис. 9. Зависимость величины капиллярного давления P_c от эффективного радиуса пор R_{eff} в КПС с Li и Sn.

пор КПС, γ — плотность лития; $\Delta P_G = \gamma gh$, где g — ускорение свободного падения, h — высота от дна; ΔP_F может быть оценено с хорошей точностью как половина давления насыщенных паров лития P_e при соответствующей температуре поверхности; $\Delta P_{MHD} = B^2 L_{CPS} v (1 + l/\delta)^2 \delta^2 / (\rho l^2)$, где B — магнитное поле, v — скорость потока лития, δ — диаметр проволоки КПС и l — размер ячейки КПС “в свету”, ρ — электрическое сопротивление лития. Выражение было получено по экспериментальным данным исследования влияния МГД на течение лития в КПС. Следовательно, КПС будет работать без повреждений во время нормальных разрядов. Возможность КПС обеспечить стабилизацию жидкого лития на поверхности КПС во время срыва плазмы определяется как $P_c \geq P_{EM}$, где P_{EM} — импульс давления в жидком литии, индуцированный электромагнитными силами во время срыва плазмы.

Возможность противостояния срыву и переходным процессам определяется следующими требованиями к структуре КПС [31], которые были определены экспериментальным и расчетным путем. Радиус пор КПС должен быть менее 140 мкм, а диаметр проволоки менее 200 мкм, чтобы

КПС оставалась неповрежденной в условиях импульсного теплового потока ~ 100 ГВт/м².

Суммарная потеря давления в КПС в условиях токамака-реактора с полем 6 Тл оценивается как 10 кПа. Следовательно, КПС с размером пор около 10–30 мкм будет работать без повреждений как при нормальном разряде, так и при срыве плазмы.

Второй (внутренний) слой должен обеспечивать протекание ЖМ в структуре КПС. Обычно оно обеспечивается за счет уменьшения падения гидравлического сопротивления созданием в КПС артериальной структуры с эффективными диаметрами артерий 100–200 мкм.

Теплопроводность пористой структуры и композиционных материалов широко изучалась. Но, для конкретных структур КПС требуется дополнительное экспериментальное исследование. Результаты расчетов для теплопроводности и данные для лития и вольфрама представлены в табл. 4.

Капиллярный эффект (капиллярное давление P_c) сильно зависит от угла смачивания. Низкая химическая активность олова является причиной проблемы с надежным смачиванием материалов основы КПС. Это приводит к значению угла сма-

Таблица 4. Теплопроводность Li, W и W+Li КПС, Вт/(м · К)

Температура, К	Теплопроводность Li	Теплопроводность W	Средняя теплопроводность КПС
700	50.6	130.2	48.6
900	55.9	120.2	49.9
1000	58.2	116.6	50.6
1200	62.1	113.5	52.3

Таблица 5. Основные параметры и коэффициент теплоотдачи теплоносителей

Теплоноситель	Давление, МПа	Скорость потока, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент теплоотдачи, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Жидкий литий	0.01	1	200	44
Вода	5	10	200	52 (закрученный поток), 25 (нормальный поток)
Газ (гелий)	15	135	200	20
Дисперсный газ-водяной поток	0.2	$40 G_{\text{газ}}/G_{\text{вода}} > 0.06$ (отношение массового расхода газ/вода)	20	70–100

чивания $\Theta > \pi/2$ и, следовательно, к низкому P_c . Для олова самое низкое значение угла смачивания равно $\Theta \sim \pi/6$ можно достигнуть только после специально разработанной методики очистки поверхности твердого металла. Кроме того, высокая удельная плотность Sn приводит к низкому капиллярному подъему в КПС, что является ограничивающим фактором для самообновления поверхности ВЭ. Поэтому чтобы обеспечить самообновление поверхности ВЭ и заполнение КПС оловом необходимо разработать специальную процедуру смачивания.

Для лития нет никаких проблем со смачиванием твердых металлических поверхностей. Угол смачивания литием стали, W и других металлов близок к нулю сразу после первой процедуры смачивания без принятия специальных мер предварительной очистки поверхности. В настоящее время испытываются конструкции ВЭ с вольфрамовой КПС, изготовленной с помощью 3D печати [32].

4. ВЫБОР ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Важным аспектом концепции является выбор теплоносителя и конструкции системы отвода тепла. Конструкция ВЭ должна обеспечивать сбалансированные уровни температуры поверхности $T_{\text{пов}}$ для соответствующего ЖМ и температуры внутренней стенки канала охлаждения $T_{\text{ст}}$. Следует учитывать, что $T_{\text{ст}}$ оказывает сильное влияние на необходимое давление теплоносителя (для жидких теплоносителей), что предотвращает возникновение кризиса теплопередачи.

Для концепции с медленно текущей тонкой пленкой ЖМ отвод тепла, как правило, осуществляется через конструкцию ВЭ к теплоносителю, протекающему в каналах системы охлаждения. Обычно в качестве теплоносителей ВЭ для термоядерного реактора рассматриваются такие теплоносители, как вода, жидкий металл (литий), газ (аргон) [1]. В настоящее время предложено использовать мелкодисперсный водяной спрей в га-

зовом потоке [33, 34]. Для однофазного теплоносителя (литий, вода, гелий) в процессе теплопередачи основную роль играют теплопроводность самого теплоносителя и конвективный теплообмен. Для газ-водяной смеси испарение является основным процессом теплопередачи при $T_{\text{ст}} > 100^{\circ}\text{C}$. Этот процесс является наиболее эффективным. При сравнении рабочих параметров и коэффициентов теплопередачи (табл. 5) различных теплоносителей видно, что эффективность отвода тепла, уровень давления и расход газ-водяного спрея имеют большие преимущества. Например, давление воды должно увеличиваться в диапазоне 1–160 атм. при повышении температуры охлаждаемой стенки от 100 до 350°C . Для газ-водяного спрея давление 2–4 атм. приемлемо при всех температурах $T_{\text{ст}} > 100^{\circ}\text{C}$. Для Li в качестве теплоносителя достаточно давления < 0.1 атм.

Таким образом, только жидкий литий и газ-водяной спрей можно считать подходящими теплоносителями, обеспечивающими приемлемые температуры поверхности ВЭ при требуемых тепловых потоках до $20 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Другие теплоносители должны иметь слишком высокие давления и расход, что приводит к большим толщинам стенок и превышению пределов для температуры поверхности ВЭ.

Для жидкого лития критической проблемой является высокое сопротивление потоку в системе охлаждения из-за МГД-сил. Для него имеется хорошая совместимость с литий- и оловосодержащими ВЭ.

Вода рассматривается как приемлемый теплоноситель для оловосодержащего ВЭ, в случае, когда температура стенки канала охлаждения ниже 200°C . Можно отметить, что в вакууме или в атмосфере инертного газа реакция лития с водой не приводит к взрыву, а только к выделению водорода. Протечка воды не должна приводить к катастрофическим последствиям, если количество лития в камере токамака-реактора не превышает заданного предела. Расход воды на охлаждение ВЭ при тепловом потоке $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$ составляет $\sim 4 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а газа — $1.7 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. С точки зрения

последствий пролива воды в вакуумную камеру реактора с литийсодержащим ВЭ такой теплоноситель менее опасен. Таким образом, газо-водяная струя может рассматриваться как оптимальный хладагент для ВЭ с ЖМ.

5. ВЫБОР БАЗОВОЙ КОНЦЕПЦИИ ДЛЯ ЛИТИЕВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ TRT

Концепция литиевой первой стенки токамака TRT определяется проектными рабочими параметрами ее элементов. Предполагается, что основная часть поверхности первой стенки подвергается стационарной (более 100 с) тепловой нагрузке на уровне $0.1-0.2 \text{ МВт/м}^2$. Кроме того, на ее поверхность возможно кратковременное ($<1 \text{ с}$) воздействие плазмы при переходных процессах. В верхней и нижней части первой стенки камеры при зажигании разряда (режим старт-лимитера) ожидаются тепловые потоки $1-5 \text{ МВт/м}^2$. В области, прилежащей к входу в дивертор, можно ожидать воздействие вертикального смещения плазменного шнура с высокими тепловыми потоками. Исходя из приведенных выше условий и результатов анализа, можно предложить следующие виды элементов первой стенки для защиты плазмы от поступления нежелательных тяжелых примесей и сохранения целостности конструкции ВЭ.

5.1. ИТЭР-подобные ВЭ первой стенки

Предполагается, что основная часть первой стенки будет формироваться из панелей на основе ИТЭР-подобных элементов с активным охлаждением потоком воды. Базовый элемент панели состоит из трубки охлаждения, изготовленной из медного сплава, облицованной пластинами бериллия. При тепловом потоке на поверхность $0.1-0.2 \text{ МВт/м}^2$ на поверхности панелей ожидается температура $<180^\circ\text{C}$. Для предотвращения повреждения медных трубок при возможном осаждении лития на их поверхность предполагается нанесение тонкого защитного покрытия из материала, совместимого с литием при указанном уровне температур.

Кондиционирование поверхности таких ВЭ возможно путем периодического нанесения тонкого слоя лития. Нанесение лития может осуществляться как с помощью испарителей с принудительным нагревом, так и эмиттеров лития, вводимых в краевую плазму токамака. Использование кондиционирования литием приводит к снижению потока примесей, поступающих в плазму, и существенно улучшает параметры плазменного разряда.

5.2. Испаритель лития

По своей сути испаритель представляет собой конструкцию, во внутреннем объеме которой содержится небольшое количество лития, достаточное для работы устройства в течение кампании токамака ТРТ. Конструкция должна быть снабжена электрическим нагревателем и термопарой для контроля потока испаренного лития. Кроме того, испаритель снабжается манипулятором для ввода в камеру и позиционирования, а также устройством, направляющим поток пара. С помощью такого испарителя в промежутках между разрядами можно будет проводить процесс нанесения литиевого слоя на заранее выбранную часть поверхности первой стенки. Для обеспечения равномерности нанесения литиевого покрытия по всему обходу камеры необходимо наличие нескольких таких устройств. Подобные конструкции были успешно использованы для литизации внутренней поверхности камеры стелларатора TJ-II и дивертора токамака NSTX [3].

5.3. Эмиттер лития

Эмиттер лития в виде неохлаждаемого лимитера, вводимого в краевую плазму, может обеспечить необходимый поток лития за счет распыления и испарения с поверхности, нагреваемой потоком плазмы. Интенсивность ввода лития регулируется за счет изменения глубины введения лимитера (расстояния до последней замкнутой магнитной поверхности) с помощью манипулятора. Такой подход позволил практически исключить поступление тяжелых примесей в плазменный шнур. Прототип такого устройства был создан (рис. 10) и успешно применялся в токамаках T-11M, T-10, FTU и стеллараторе TJ-II [35]. Поверхность лимитера покрывается капиллярно-пористой структурой (КПС), пропитанной литием. Это обеспечивает возможность стабилизации жидкого лития при воздействии электромагнитных сил и исключает его разбрызгивание. Кроме того, КПС позволяет создать устройство с различной формой и ориентацией в пространстве. Подача лития в эмиттер может осуществляться как из встроенной емкости, так и с наружи камеры без нарушения вакуума.

5.4. Старт-лимитер

Использование специального старт-лимитера позволит защитить элементы первой стенки от воздействия тепловых потоков уровня 5 МВт/м^2 на начальной стадии формирования плазменного разряда. Такие лимитеры устанавливаются в верхней и нижней области первой стенки. Конструкция такого лимитера должна включать как систему охлаждения, способную поддерживать температуру литиевой поверхности на уровне не

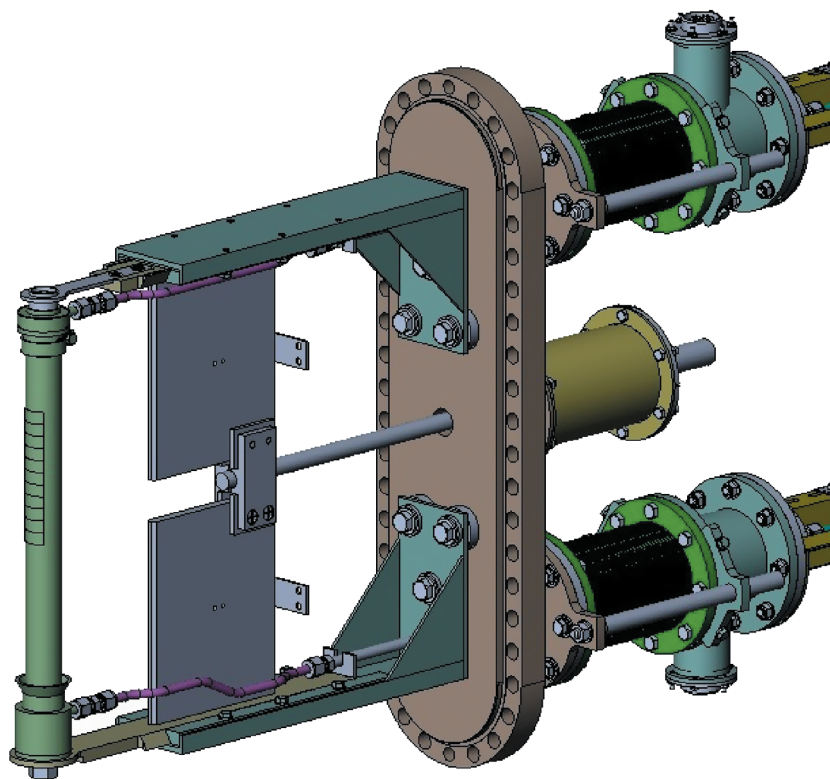


Рис. 10. Прототип эмиттера лития для испытаний на токамаке Т-11М.

выше 500–600°C для ограничения потока атомов лития в плазму, так и систему подпитки литием.

Прототипом такого лимитера может служить разрабатываемый для токамака Т-15МД стационарный литиевый лимитер [21] на основе КПС, в котором воплотились основные идеи концепции ВЭ для стационарного токамака-реактора (рис. 11).

Лимитер снабжен системой перемещения относительно плазмы токамака и предназначен для стационарной работы при тепловой нагрузке 10 МВт/м². Такой лимитер может работать в тандеме с аналогичным лимитером, действуя поочередно как эмиттер или коллектор лития, обеспечивая тем самым замкнутый контур циркуляции атомов лития в камере токамака, что предотвращает накопление лития на стенках токамака в процессе длительной эксплуатации. В качестве теплоносителя системы теплоотвода используется газо-водяной спрей. Лимитер снабжается литием (для заполнения лимитера и обеспечения очистки поверхности) с помощью электромагнитного насоса из внешней системы.

Реализация рассматриваемой концепции ВЭ была апробирована на серии моделей стационарно работающих ВЭ с ЖМ для токамаков Т-11М, FTU, КТМ [35–39]. Созданные модели имеют возможность обеспечивать работу ВЭ в темпера-

турном диапазоне 200–550°C при стационарном тепловом потоке до 10 МВт/м².

Для обоснования планируемого проекта жидкометаллического дивертора токамака КОМПАСС-АПГРЕЙД была проведена серия экспериментов с диверторными мишенями на основе КПС с Li и сплавом LiSn [40, 41]. Оценка допустимой мощности дивертора на основе КПС с жидкими металлами и поведения жидких металлов в условиях дивертора была впервые выполнена в условиях токамака КОМПАСС (Н-режим с ЭЛМами). Специальные модули дивертора (25 × 45 мм) на основе молибденовой КПС с радиусом поры 75 мкм и заполненные литием и сплавом Li–Sn (73% Sn), были установлены в открытый дивертор токамака КОМПАСС на внутреннем пересечении с сепаратриссой. Вид такого модуля и его расположение в диверторе представлены на рис. 12 и 13 соответственно. Никаких повреждений КПС и нарушения тепловоспринимающей способности не наблюдалось для обоих вариантов модулей при установившемся нормальном тепловом потоке на поверхность до 12 МВт/м² и локальной пиковой энергетической нагрузке порядка 15 кДж/м². Эжекция капель жидкого металла с поверхности КПС не наблюдалась.

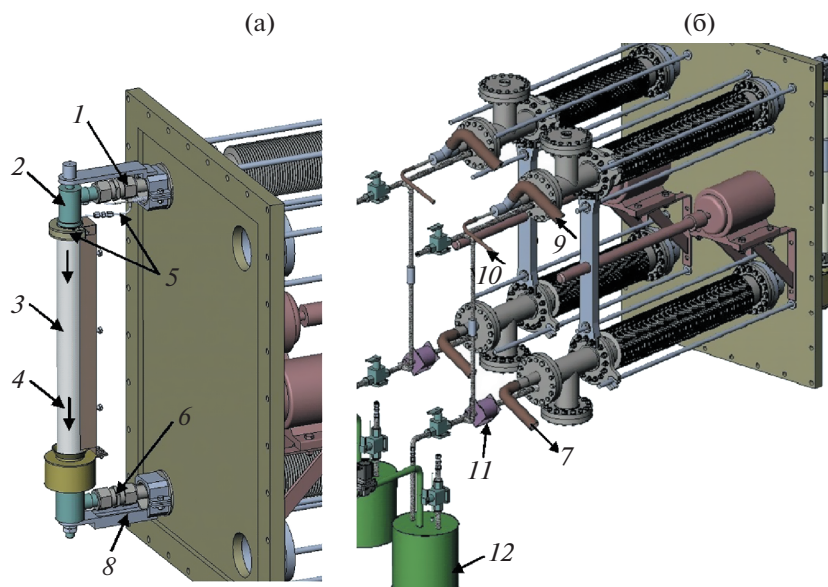


Рис. 11. Схема жидкометаллического литиевого лимитера токамака Т-15МД: внутрикамерный элемент (а); внешняя система подачи лития и система охлаждения (б). На рисунке цифрами обозначены: 1 – подача газа/воды во внутрикамерный элемент; 2 – форсунка; 3 – КПС; 4 – поток лития; 5 – подача лития во внутрикамерный элемент; 6, 7 – отвод хладагента из внутрикамерного элемента; 8 – отвод лития из внутрикамерного элемента; 9 – подача газа в магистральный трубопровод; 10 – подача воды в магистральный трубопровод; 11 – электромагнитный насос; 12 – емкость с литием.

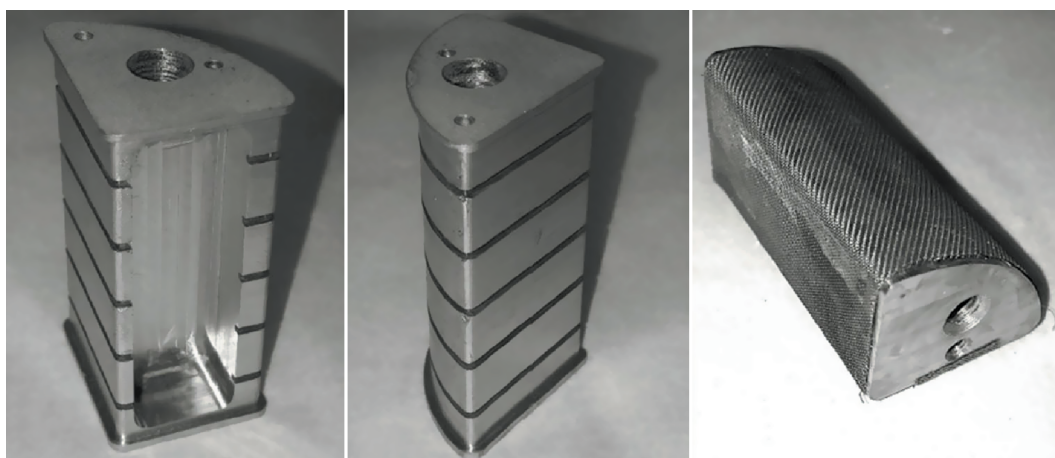


Рис. 12. Конструкция модуля дивертора на основе КПС.

Только при увеличении теплового потока до 16–18 МВт/м² наблюдалось осушение и плавление поверхностного слоя КПС литиевого модуля, что связывалось с потерей теплового и гидравлического контакта поверхностного слоя с основой вследствие его теплового расширения. Этот эффект является частной особенностью структуры использованной КПС, а не принципиальным недостатком. На дальнейшей работоспособности модуля возникший дефект не сказался. Температура поверхности литиевого модуля достигала

450°С. Воздействие ELM приводило к повышению его температуры на 40–45°С. Наблюдалось свечение нейтрального лития в области диаметром 60 мм вокруг модуля. При этом эффект экранирования поверхности модуля облаком пара лития был очень слабым. Оцененная доля переизлучаемого теплового потока не превышала 0.1–0.2 МВт/м², что очевидно связано с низким давлением пара при наблюдаемой температуре. Распространение однократно (зеленый) и двукратно

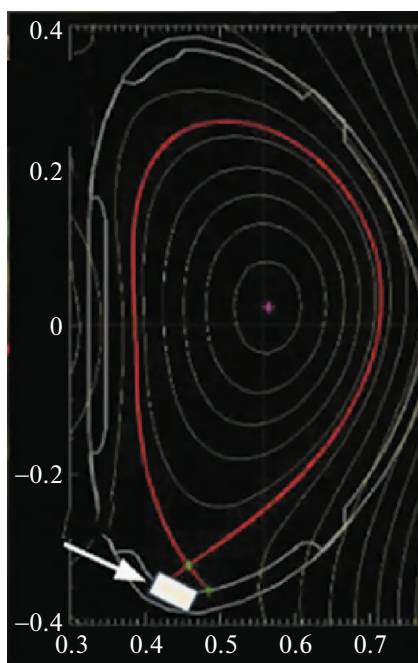


Рис. 13. Расположение модуля дивертора в токамаке КОМПАСС (полоидальное сечение плазменного шнура токамака), стрелкой указано расположение модуля дивертора.

(синий) ионизированного лития в камере токамака представлено на рис. 14.

При тепловом потоке до 12 МВт/м^2 поступления примеси олова в разряд не наблюдалось. Температура поверхности модуля достигала 950°C . Анализ двух наборов по 14 образцов, установленных по обходу камеры токамака, показывает, что существенное количество лития обнаружено в окрестности модуля в пределах $\pm 40 \text{ см}$. Таким образом, показано, что только литий поступает в разряд из сплава Li–Sn. Как и в предыдущем случае, экранировка паром лития не имела заметного вклада из-за относительно низкого давления пара лития при наблюдаемой температуре. Введе-

ние обоих типов модулей в плазму токамака не повлекло за собой никаких изменений в поведении плазменного разряда.

В работе [42] в качестве альтернативного решения проблемы стойкости элементов дивертора при тепловых потоках до 20 МВт/м^2 рассматривается концепция жидкометаллического дивертора стационарного токамака EU-DEMO на основе КПС с жидким оловом. Предложены конструктивные решения на основе опыта использования жидкометаллических лимитеров токамака FTU конструкции, ранее разработанной в АО “Красная Звезда”.

Используемые подходы могут быть реализованы для создания приемных элементов первой стенки и дивертора токамака TRT.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что концепция, включающая стабилизацию поверхности жидкого металла с помощью КПС, имеет существенные преимущества и должна быть положена в основу базовой концепции литиевой первой стенки ТРТ. Практический опыт создания и испытаний ВЭ с ЖМ позволяет решить ряд критических вопросов при разработке соответствующей конструкции ВЭ, отвечающей требованиям к длительной эксплуатации в условиях токамака-реактора. КПС с литием обеспечивает защиту и обновление поверхности ВЭ в условиях штатного разряда, при срывах и различного рода неустойчивостях.

Элементы первой стенки, испытывающие воздействие тепловых потоков до 1 МВт/м^2 , могут быть созданы на основе конструкции ИТЭР-подобных элементов с водяным охлаждением. Причем их модификация должна обеспечить совместимость основных конструкционных материалов с напыленным литием. Кондиционирование первой стенки путем напыления лития с целью улучшения параметров плазменного разряда может быть осуществлено с помощью испарителей или/и эмиттеров.

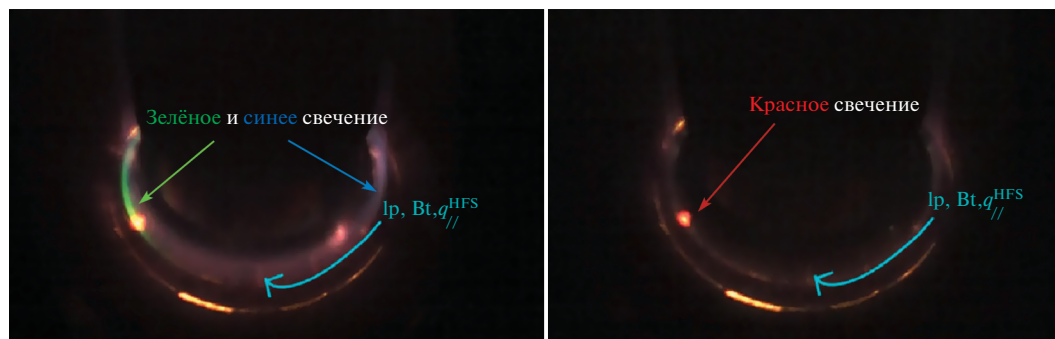


Рис. 14. Наблюдение поведения лития в разряде: во время ELM (а); между ELM (б).

Защита первой стенки на начальной стадии иницирования разряда и на стадии его гашения может осуществляться с помощью охлаждаемых защитных лимитеров. Конструкция таких лимитеров должна строиться на основе использования литиевой КПС, систем охлаждения, подпитки и вывода лития из камеры для обеспечения стационарного режима работы. При соответствующем выборе конструкционных материалов, системы охлаждения и теплоносителя возможно обеспечить стационарный режим работы при тепловых потоках 10 МВт/м² и более. На основе такого подхода могут быть созданы и приемные элементы дивертора.

Работа была выполнена при финансовой поддержке госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Federici G., Biel W., Gilbert M.R., Kemp R., Taylor N., Wenninger R.* // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 092002. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/57/9/092002>
2. *Stork D., Agostini P., Boutard J.-L., Buckthorpe D., Diegele E., Dudarev S., English C., Federici G., Gilbert M.R., Gonzalez S., Ibarra A., Linsmeier C., Puma A.L., Marbach G., Morris P.F., Packer L.W., Raj B., Rieth M., Tran M.Q., Ward D.J., Zinkle S.J.* // J. Nuclear Materials. 2014. V. 455. P. 277. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.06.014>
3. *Nygren R.E., Tabarés F.L.* // Nuclear Materials and Energy. 2016. V. 9. P. 6. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.08.008>
4. *Tabares F., Oyarzabal E., Castro De A.* // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 016029. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/1/016029>
5. *Jaworski M.A., Brooks A., Kaita R., Menard J., Ono M., Tresemer K., Lopes-Cardozo N., Rindt P.* // Fusion Engineering Design. 2016. V. 112. P. 93.
6. *Mirnov S.V., Azizov E.A., Alekseyev A., Lazarev V.B., Khayrutdinov R.R., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Vershkov V.V.* // Nuclear Fusion. 2011. V. 51. P. 073044. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/7/073044>
7. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A.* // Plasma Devices Oper. 2009. V. 17. P. 42.
8. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B.* // J. Nuclear Materials. 2015. V. 463. P. 1156. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.017>
9. *Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В.* // Физика плазмы (данный выпуск).
10. *Yang J.C., Qi T.Y., Liu B.Q., Ni M.J.* // Proc. of 5th Internat. Symp. Liquid Metals Application for Fusion, 2017, Moscow.
11. *Hu J.* // Proc. of 5th Internat. Symp. Liquid Metals Application for Fusion, 2017, Moscow.
12. *Hu J.S., Zuo G., Ren J., Qingxi Y., Chen Z., Xu H., Zakharov L.E., Maingi R., Gentile C., Meng X.C., Sun Z., Xu W., Chen Y., Fan D., Yan N.O., Duan Y., Yang Z.D., Zhao H., Song Y.T., Zhang Y.D., Wan B.N., Li J.G.* // Nuclear Fusion. 2016. V. 56. P. 046011. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/56/4/046011>
13. *Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V.* // J. Advanced Materials. 1995. V. 2. P. 650.
14. *Жарков М.Ю., Вертков А.В., Люблинский И.Е., Вершков В.А., Грашин С.А., Ноткин Г.Е.* // Материалы XXIV конференции “Взаимодействие плазмы с поверхностью”. Москва, 4–5 января 2021 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 67.
15. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V.* // Fusion Engineering Design. 2010. V. 85. P. 924. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.08.036>
16. *Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Petrova N.P., Sotnikov S.M., Chernobai A.P., Khripunov B.I., Prokhorov D.Yu., Korzhavin V.M.* // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2002. V. 44. P. 955.
17. *Golubchikov L.G., Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Pistunovich V.I., Potapov I.N., Chumanov A.N.* // J. Nucl. Mater. 1996. V. 233–237. P. 667.
18. *Golston R.* // Physica Scripta. 2016. V. T167. P. 014017.
19. *Morgan T.* // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2018. V. 60. P. 014025. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa86cd>
20. *Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T., Dzhurik A.S.* // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 123015. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/12/123015>
21. *Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu., Berlov A.V., Mirnov S.V., Komov A.T., Varava A.N., Zakharenkov A.V., Mazzitelli G., Iafrati M.* // Proc. of 27th IAEA FEC, 2018. Ahmedabad, India. P. 209.
22. *Lyublinski I.E., Evtikhin V.A., Vertkov A.V.* // Plasma Devices Oper. 2009. V. 17. P. 265.
23. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Semenov V.V., Azizov E.A., Lazarev V.B., Mirnov S.V.* // Fusion Engineering Design. 2014. V. 89. P. 996. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.073>
24. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Sevryukov O.N., Dzhumaev P.S., Shumskiy V.A., Ivannikov A.A.* // J. of Physics Conference Series 748 (1): 012014, 2016.
25. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Semenov V.V.* // Physics of Atomic Nuclei. 2016. V. 79. P. 1163.
26. *Morgan T., Vertkov A.V., Bystrov K., Lyublinski I.E., Genuit J.W., Mazzitelli G.* // Nuclear Materials Energy. 2017. V. 12(C). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.017>
27. *Sharafat S., Ghoniem N.* // APEX Study, UCLA-UC-MEP-00-31 Report, 2000.
28. *Anderl R.A., Jenson D.D., Kessinger G.F.* // J. Nuclear Materials. 2002. V. 307. P. 739. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)00975-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)00975-3)
29. *Люблинский И.Е., Вертков А.В., Евтихин В.А.* // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2007. Вып. 4. С. 13.

30. *Wenninger R.P., Bernert M., Eich T., Fable E., Federici G., Kallenbach A., Loarte A., Lowry C., McDonald D., Neu R., Putterich T., Schneider P., Sieglin B., Strohmayer G., Reimold F., Wischmeier M.* // Nuclear Fusion. 2014. V. 54. P. 114003.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/54/11/114003>
31. *Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu., Mirnov S.V., Vershkov V.V., Mazzitelli G., Iafrati M., Tabares F., Tazhibayeva I.* // Proc. of 5th International Symposium on Liquid Metals Application for Fusion. 2017. Moscow. Doi: 30791/1028-978X-2018-10-15-24.
32. *Rindt P., Korving S., Morgan T., Cardozo N.L.* // Nuclear Fusion, 2021 (in Press).
33. *Vertkov A.V., Lyublinski I.E., Zharkov M.Yu., Mazzitelli G., Apicella M.L., Iafrati M.* // Fusion Engineering Design. 2017. V. 117. P. 130.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.01.041>
34. *Вертков А.В., Комов А.Т., Люблинский И.Е., Мирнов С.В., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Фрик П.Г.* // ВАЭТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. С. 57.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2017-41-1-57-64>
35. *Вертков А.В., Люблинский И.Е., Жарков М.Ю.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 572.
<https://doi.org/10.1134/S0367292118070077>
36. *Mazzitelli G., Apicella M.L., Apruzzese G.M., Crescenzi F., Iannone F., Maddaluno G., Pericoli-Ridolfini V., Roccella S., Reale M., Viola B., Vertkov A.V., Lyublinski I.E.* // J. Nuclear Mater. 2015. V. 463. P. 1152.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.050>
37. *Iafratti M., Apicella M.L., Boncagni L., Lyublinski I.E., Mazzitelli G., Vertkov A.V.* // Fusion Engineering Design. 2017. V. 117. P. 157.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.005>
38. *Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Zharkov M.Yu., Semenov V.V., Mirnov S.V., Lazarev V.B., Tazhibayeva I.L., Shapovalov G.V., Kulsartov T.V., D'yachenko A.V., Mazzitelli G., Agostini P.* // Fusion Engineering Design. 2013. V. 88. P. 1862.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.103>
39. *Tazhibayeva I., Shapovalov G., Kulsartov T., Ponkratov Y., Lyublinski I., Vertkov A., Mazzitelli G., Azizov E. and Mirnov S.* // Proc. of 25th IAEA FEC, 2014, St. Petersburg, Russian Federation, CN-221, MPT/P8-13. P. 651.
40. *Dejarnac R., Horacek J., Hron M., Jerab M., Adamek J., Atikukke S., Barton P., Cavalier J., Cecrdle J., Dimitrova M., Gauthier E., Iafrati M., Imrisek M., Marín-Roldán A., Mazzitelli G., Naydenkova D.I., Prishvitsyn A., Tomes M., Tskhakaya D., Oost G.V., Varju J., Veis P., Vertkov A.V., Vondracek P., Weinzettl V.* // Nuclear Materials and Energy. 2020. V. 25. P. 100801.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100801>
41. *Horacek J., Dejarnac R., Cecrdle J., Tskhakaya D., Vertkov A.V., Cavalier J., Vondracek P., Jerab M., Barton P., Oost G.V., Hron M., Weinzettl V., Sestak D., Lukes S., Adamek J., Prishvitsyn A., Iafratti M., Gasparyan Y., Vasina Y., Naydenkova D.I., Seidl J., Gauthier E., Mazzitelli G., Komm M., Gerardin J., Varju J., Tomes M., Entler S., Hromadka J., Panek R.* // Nuclear Materials and Energy. 2020. V. 25. P. 100860.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100860>
42. *Roccella S., Dose G., de Luca R., Iafrati M., Mancini A.* // J. Fusion Energy. 2020. V. 39. P. 462.
<https://doi.org/10.1007/s10894-020-00263-4>