УДК: 535-15, 539.219.1

ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ЛИТИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВАКУУМЕ*А.С. Пришвицын, С.А. Крат, А.П. Харина, А.А. Писарев**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

Корректная интерпретация данных ИК-видеонаблюдения за поверхностями обращённых к плазме элементов термоядерных установок требует детального представления о степени черноты этих поверхностей в различных условиях. В работе представлены результаты измерений в вакууме степени черноты свободной поверхности металлического лития и поверхности плёнки лития, подерживаемой на капиллярно-пористой системе (КПС) в зависимости от температуры в диапазоне от 400 до 800 К. Степень черноты твёрдого лития менялась от ~0,04 при 400 К до ~0,09 при 453 К. При плавлении наблюдалось резкое уменьшение черноты до ~0,04. При увеличении температуры от 455 до 800 К степень черноты линейно увеличивалась от 0,04 до ~0,15. Для полностью смоченной КПС степень черноты была близка к таковой для свободной литиевой поверхности до температуры ~570 К, при большей температуре она была ниже, вероятно, из-за изменения микрорельефа поверхности при высоких температурах.

Ключевые слова: ИК-термометрия, степень черноты, литий, капиллярно-пористые системы.

THE DEPENDENCE OF LITHIUM EMISSIVITY FROM TEMPERATURE IN VACUUM*A.S. Pricshivichin, S.A. Krat, A.P. Harina, A.A. Picarev**National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

Correct interpretation of IR video observation data of the surfaces of plasma-facing elements in fusion devices requires detailed knowledge about the emissivity factor of these surfaces in different conditions. In this work, results of emissivity measurements for free metallic lithium surface and a lithium surface supported by the capillary-porous system (CPS) are measured as a function of temperature in the range from 400 to 800 K. Emissivity of solid lithium changed from ~0.04 at 400 K to ~0.09 at 453 K. During melting a sudden drop of emissivity down to ~0.04 was observed. Emissivity increased linearly from 0.04 to ~0.15 with temperature increasing from 455 to 800 K. For fully wetted CPS, emissivity was close to that of free lithium surface for temperature up to ~570 K, while at higher temperature it was lower, probably due to changes in microrelief at high temperatures.

Key words: IR thermometry, emissivity, lithium, capillary-porous systems.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-89-95

ВВЕДЕНИЕ

Альтернативой традиционной концепции элементов термоядерных установок, испытывающих максимальные энергетические нагрузки, предполагающей использование тугоплавких материалов, таких как вольфрам или углерод, является концепция жидкометаллических элементов, обращённых к плазме. Такой подход устраняет проблему охрупчивания материалов за счёт накопления радиационных дефектов и газа и обеспечивает режим нулевого рециклинга газа за счёт высокой эффективности его захвата в жидкий металл и возможности осуществления очистки металла от газа за пределами разрядной камеры.

Среди всех жидких металлов, рассматриваемых в качестве кандидатов для обращённых к плазме элементов (галлий, олово, литий, эвтектики этих металлов) [1—4], литий — наиболее перспективен. Малый атомный номер лития, его низкая температура плавления и высокая температура кипения, геттерные свойства по отношению к изотопам водорода и основным газам — составляющим атмосферного воздуха [5, 6], низкая энергия ионизации, а также другие физические и химические свойства делают его хорошо совместимым с термоядерной плазмой. Экспериментально было показано, что использование лития в термоядерных установках типа токамак ведёт к увеличению времени удержания плазмы, уменьшению количества примесей в плазме, понижению рециклинга водорода [7].

Применение жидколитиевых элементов в токамаках [3, 8, 9] требует создания новых и адаптации существующих диагностик. Одним из способов наблюдения в процессе разряда за состоянием литиевой поверхности является использование высокоскоростных камер в инфракрасном диапазоне [10—13]. Для корректной интерпретации данных, т.е. для восстановления температуры поверхности по сигналу ИК-камеры, необходимо знать зависимость степени черноты обращённых к плазме поверхностей материалов при различных температурах и состояниях поверхности. Для твёрдых тугоплавких материалов (W,

Ве, сталь) эти данные хорошо известны, однако для литья точных данных в диапазоне температуры до 800 К нет [14]. Так как в обращённых к плазме жидколитиевых элементах токамаков поверхность литья обычно не свободная, а сформирована с помощью капиллярно-пористой системы (КПС), пропитанной литием, применимость даже имеющихся данных требует дополнительного анализа.

В данной работе представлены результаты исследования зависимости степени черноты свободной литиевой поверхности и поверхности тонкой плёнки литья, поддерживаемой на КПС, от температуры их поверхности в вакуумных условиях, приближенных к условиям в токамаках.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Рис. 1. Принципиальная схема системы измерения серости литиевых поверхностей в условиях, приближенных к токамаку Т11-М: 1 — вакуумная камера; 2 — инфракрасная камера FLIR A665sc с системой обработки данных; 3 — система газонапуска, состоящая из трёх баллонов (H_2 99,98% чистоты, O_2 99,98% чистоты, N_2 99,999% чистоты), подключённых к вакуумной камере посредством регулятора расхода газа РРГ-12 с компьютерным управлением; 4 — нагреваемый держатель образца; 5 — термопара К-типа (хромель-алюмель) с системой записи данных

прессовывался в кювету диаметром 49 мм, глубиной 3,5 мм, выполненную из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, которая химически не взаимодействует с литием во всём диапазоне исследуемых температур.

Ёмкость с литием располагалась непосредственно над нагревательным элементом (4) таким образом, чтобы максимально избежать засветки сигнала ИК-камеры прямым излучением нагревательного элемента. В качестве нагревательного элемента использовались керамические нагреватели, выполненные из вакуумплотной алюминиевой керамики с впечённой вольфрамовой полосой. Теплопередача между нагревателем и ёмкостью с литием происходила, в основном, за счёт теплопроводности, что позволяло максимально уменьшить общую мощность нагревателя и засветку камеры от него. Максимально достижимая температура литья составляла ~ 800 К, что определяло максимальную температуру измерений. Минимальная температура измерений составляла 400 К, что было обусловлено влиянием стенок вакуумной камеры на измерения при низкой температуре.

Температура исследуемой поверхности определялась с помощью стандартной термопары К-типа (хромель-алюмель) (5) в режиме реального времени с частотой измерений 5 Гц. Горячий конец термопары помещался непосредственно внутрь литья путём его предварительной запрессовки в твёрдый литий. Параллельно с помощью второй аналогичной термопары велась запись изменения температуры стенки камеры в процессе эксперимента. Для тепловой стабилизации холодных концов термопар использовался специальный электрический вакуумный ввод с хромелевыми и алюмелевыми контактами, такой, что

Для измерения коэффициентов серости свободной поверхности литья и литиевых капиллярно-пористых систем на основе установки МР-2 [15] была создана система измерения степени черноты. Её схема представлена на рис. 1.

Давление в вакуумной камере составляло $6 \cdot 10^{-6}$ Па после литиизации её стенок (1), что сравнимо с условиями в токамаках. Для измерения степени черноты поверхности литиевого образца использовалась камера FLIR A665sc (2), диапазон измерений которой составлял 7,5—14 мкм, чувствительность детектора теплового излучения в инфракрасном диапазоне $3 \cdot 10^{-5}$ К. Физический принцип действия камеры FLIR A665sc болометрический. Для создания вакуумных условий, схожих с токамаками, использовалась система газонапуска (3).

Наблюдение за поверхностью литья в процессе изменения температуры производилось через диагностическое окно из селенида цинка (ZnSe) толщиной 5 мм. Для предотвращения быстрого заплытия окна литием перед окном установлена подвижная шторка.

Для анализа свободной поверхности литий за-

эффективный конец термопар находился вне вакуумной камеры и охлаждался атмосферным воздухом. Температура воздуха контролировалась термометром сопротивления, расположенным в непосредственной близости к экспериментальной установке. Измерение степени черноты проводилось в процессе остывания литиевой поверхности, когда внутреннюю поверхность вакуумной камеры можно было считать абсолютно чёрным телом.

Для измерения степени черноты поверхности КПС, наполненных литием, свободная поверхность лития закрывалась сверху двумя слоями мелкоячеистой (300 ячеек на линейный дюйм) молибденовой сетки. Сетка приваривалась к ободу цилиндрической ёмкости и впрессовывалась в литий для облегчения последующего смачивания. В КПС был сделан небольшой вырез, через который в литий вставлялась термопара.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Непосредственно перед установкой литиевого образца в вакуумную камеру его поверхность очищалась путём удаления верхнего слоя $\sim 0,5$ мм. После установки образца вакуумная камера откачивалась до $\sim 8 \cdot 10^{-5}$ Па, затем производилась литиизация стенок. Для этого литий медленно нагревался до 500°C и удерживался при этой температуре до испарения $\sim 0,5$ мм лития, одновременно происходило обезгаживание лития. Так как все соединения лития, появления которых можно ожидать при кратковременном взаимодействии металлического лития с атмосферным воздухом (гидроксид, оксид, нитрид лития), имеют плотность большую, чем плотность лития, предполагалось, что поверхность лития очищена за счёт осаждения более тяжёлых соединений на дно кюветы. Часть примесей может удаляться с поверхности вместе с паровым потоком лития, а часть разлагаться и испаряться. Скорость испарения лития была предварительно измерена и совпадала с литературными данными [16]. После предварительной очистки литий остужался до комнатной температуры и достигался предельный вакуум $\sim 6 \cdot 10^{-6}$ Па.

При измерении степени черноты литий сначала нагревался до температуры 550 K и выдерживался при данной температуре, пока температура стенок камеры не становилась постоянной, после чего излучение стенок можно было считать излучением идеально чёрного тела. После наступления термодинамического равновесия в системе производился быстрый нагрев до максимальной температуры измерений ($\sim 800\text{ K}$), питание нагревателя отключалось, заслонка между диагностическим ИК-окном и литием, до этого закрытая, открывалась и велась синхронизированная запись мощности ИК-излучения с поверхности лития и температуры поверхности лития и стенок по мере охлаждения лития.

По полученным экспериментальным результатам производился расчёт степени черноты литиевой поверхности [17]. Под степенью черноты здесь понимается отношение плотности мощности излучения исследуемой поверхности, интегрированной по рассматриваемому диапазону длин волн (от $7,5$ до 14 мкм), к плотности мощности излучения абсолютно чёрного тела, интегрированного по тому же диапазону длин волн. Для этого степень черноты подбиралась такой, чтобы оптическая температура, т.е. температура, измеренная по мощности ИК-излучения поверхности лития, совпадала с температурой, измеряемой термопарным термометром. Для расчёта использовались следующие формулы [17]:

$$E_0 = \varepsilon E_R \left(1 + \frac{d}{1-d} \right) + (1-\varepsilon) \varepsilon_w E_w \frac{1}{1-d};$$

$$d = (1-\varepsilon)(1-\varepsilon_w) F_{S-w} \frac{S_S}{S_w},$$
(1)

где E_S — интенсивность излучения, регистрируемая ИК-камерой с поверхности литиевого образца; ε — степень черноты литиевого образца, определяемая из уравнения (1) по известным остальным величинам; S_S , S_w — площадь поверхностей литиевого образца и стенок вакуумной камеры соответственно; E_R , E_w — интенсивность излучения чёрного тела при температуре образца и стенок вакуумной камеры соответственно, регистрируемой термопарными измерителями температуры; F_{S-w} — геометрический фактор, учитывающий видимость стенок камеры с поверхности образца и определяемый из их взаимного геометрического расположения ([17], формула 4); ε_w — степень черноты стенок вакуумной камеры, принимавшаяся при остывании лития равной 1, так как вакуумная камера представляет собой классический пример абсолютно чёрного тела — замкнутой полости с малым отверстием [18].

В использованной расчётной формуле (1) учитывается, что общая интенсивность излучения, приходящая на детектор, состоит из интенсивности излучения, излучаемой с поверхности исследуемого образца и попадающей непосредственно на детектор, интенсивности излучения, излучаемой с поверхности стенок вакуумной камеры и попадающей непосредственно на детектор, интенсивности излучения, излучённой с поверхности образца и отражённой от стенок вакуумной камеры перед попаданием в детектор, и интенсивности излучения, излучённой с поверхности стенок вакуумной камеры и отражённой от поверхности образца перед попаданием в детектор. Метод расчёта, учитывающий отражение излучения между исследуемым образцом и стенками вакуумной камеры, основан на работе [19].

Анализ производился также и с помощью встроенного программного обеспечения ResearchIR ИК-камеры FLIR A665sc. Результаты этого анализа, однако, имеют меньшую достоверность и приводятся в качестве справки в связи с проприетарностью формул, используемых в программном обеспечении, и отсутствием их подробного описания в открытом доступе.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рис. 2. Зависимость степени черноты свободной литиевой поверхности от её температуры: ■ — расчёт с помощью программного обеспечения ResearchIR; ○ — расчёт на основе экспериментальных данных с помощью формулы (1), для лучшего различения точек представлена каждая 20-я точка; — степень черноты свободной плоской поверхности лития, предсказанная по формуле Фута [20]; — аппроксимация степени черноты (453—800 K) для жидкой литиевой фазы по формуле [21]; — аппроксимация для твёрдой литиевой фазы по формуле (400—453 K) [21]

что оксиды и/или гидроксиды лития, которые образуются на поверхности и могут влиять на черноту, остаются на твёрдой поверхности, но опускаются на дно в жидкой фазе.

Согласно формуле Фута [20], основанной на классической электромагнитной теории, с использованием приближения нормальной монохроматической степени черноты металлов, которая рассчитывается по формуле Хагена—Рубенса [22, 23], степень черноты плоской поверхности лития в ИК-диапазоне связана с его электропроводностью следующим образом:

$$\varepsilon(T) = 5,76\sqrt{\rho T} - 17,9\rho T + 44,3(\rho T)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

где T — температура, K; ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом·м. Удельное сопротивление лития в зависимости от температуры описывается в [25] следующим выражением:

$$\rho(T) [\text{Ом} \cdot \text{м}] = \begin{cases} (-985,1717 + 3,656 \cdot 10^{-2} T [K]) 10^{-8}, & T < 453,5 \text{ K}; \\ (8,702 + 3,710 \cdot 10^{-2} T - 6,795 T^2) 10^{-8}, & T > 453,5 \text{ K}. \end{cases}$$

Степень черноты свободной литиевой поверхности в высоком вакууме. Полученная зависимость степени черноты свободной литиевой поверхности от температуры, измеренная по мере охлаждения от 800 K, представлена на рис. 2.

Можно видеть, что для обоих методов обработки результатов измерений наблюдается в целом одинаковая зависимость коэффициента серости от температуры, что говорит о принципиальной возможности использования программного обеспечения камеры для анализа температуры без необходимости дополнительного пересчёта. Отклонение в результатах, полученных с помощью программного обеспечения ResearchIR [22], вероятно, связано с некорректным учётом влияния излучения, многократно отражённого между исследуемым образцом и стенками вакуумной камеры.

Скачкообразное изменение степени черноты при температуре ~450 K может быть обусловлено фазовым переходом лития из жидкого состояния в твёрдое при охлаждении. Помимо этого, изменение степени черноты может быть связано с тем,

Таким образом, зависимость серости от температуры можно получить, зная зависимость серости от электропроводности и зависимость электропроводности от температуры. Можно видеть (см. рис. 2), что предсказание формулы Хагена—Рубенса плохо описывает черноту лития, наблюдавшуюся в эксперименте. Можно предположить, что при низкой температуре загрязнение поверхности лития приводит к изменению его черноты. Альтернативным объяснением может быть отличие фактической проводимости лития от указанной в литературе из-за наличия примесей в нём. При более высокой температуре в расплаве схожая проблема уже наблюдалась для ряда расплавов металлов [26], что говорит о невозможности применения формул, основанных на классической теории электромагнетизма к описанию черноты литиевой поверхности вблизи и выше точки плавления. При этом, несмотря на существенное различие с теорией, степень черноты лития оказалось возможным успешно описать математической формулой той же структуры, что и уравнение (2), как предложено в модели [21]:

$$\varepsilon(T) = a_0 \sqrt{T} - a_1 T + a_2 T^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

где a_0 , a_1 , a_2 — подгоночные коэффициенты, связанные с удельным сопротивлением лития при заданной температуре (см. таблицу). Это оправдано тем, что монохроматическая степень черноты металлов может быть описана как ряд по степеням $\sqrt{\frac{\rho}{\lambda}}$, где ρ — удельное электрическое сопротивление, λ — длина волны. Для интегральной нормальной степени черноты таким образом можно использовать описание в виде ряда по степеням $\sqrt{T}$.

Подгоночные параметры для аппроксимации степени черноты свободной литиевой поверхности в твёрдой и жидкой фазах для температурного диапазона 400—800 К

Фаза	Температура, К	a_0	a_1	a_2
Твёрдая	400—453	0,25	$2,60 \cdot 10^{-2}$	$6,83 \cdot 10^{-4}$
Жидкая	453—750	0	$3,35 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$

Рис. 3. Зависимость степени черноты от температуры: ☆ — полностью смоченная КПС; ◇ — частично смоченная КПС; × — свободная литиевая поверхность. Для лучшего зрительного восприятия точек представлена каждая 20-я точка

Степень черноты наполненной литием КПС. Полученная зависимость степени черноты КПС, заполненной литием, от температуры представлена на рис. 3.

Можно видеть, что коэффициент серости полностью смоченной КПС и коэффициент серости свободной чистой литиевой поверхности практически одинаковы для температуры до ~570 К, т.е. для температуры, при которой скорость испарения лития становится существенной. Различие между полностью смоченной КПС и свободной поверхностью при высокой температуре может быть связано также с изменением смачиваемости КПС литием [27], из-за чего микроскопическая геометрия поверхности КПС может претерпевать изменения. Скачок степени черноты, характерный для свободной литиевой поверхности, наблюдался как для полностью, так и для частично смоченной КПС.

При этом величина скачка была меньше по сравнению с таковой для свободной литиевой поверхности и мало отличалась для полностью и частично смоченных участков КПС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диапазоне температуры от 400 до 800 К выполнены измерения температурных зависимостей степени черноты лития и капиллярно-пористой системы, заполненной литием, в вакууме.

С ростом температуры свободной литиевой поверхности степень черноты в твёрдой фазе увеличивается от $\sim 0,04$ при 400 К до $\sim 0,09$ при 453 К. При плавлении коэффициент серости скачком уменьшается до $\sim 0,04$ и при увеличении температуры жидкой фазы возрастает до $\sim 0,15$ при 800 К. Рост степени черноты с увеличением температуры происходит практически линейно как в твёрдой фазе, так и в жидкой фазе и не описывается классической формулой Фута. Отклонение степени черноты твёрдого лития от предсказаний формулы Фута может быть связано либо с загрязнением поверхности лития оксидным слоем, либо с существенным отличием электропроводности использованного в исследовании лития от литературных данных для неё.

Для поверхности КПС, полностью смоченной литием, зависимость степени черноты от температуры практически полностью совпадает с таковой для свободной литиевой поверхности при температуре от ~ 420 до ~ 570 К. В области высокой температуры наблюдается отклонение степени черноты в область меньших значений, что, по-видимому, можно объяснить влиянием изменения микрорельефа КПС из-за капиллярного взаимодействия жидкого лития с молибденовой матрицей.

Экспериментальные данные получены в рамках работ по договору № 0000000007417PF10002/00-3-021-0464 с АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Анализ полученных данных, сравнение с теоретическими моделями, связь полученных данных с литературными сведениями об электрофизических свойствах лития выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 18-72-00213.

REFERENCES

1. **Kaita R. et al.** Liquid lithium limiter effects on tokamak plasmas and plasma. — In: 19th Intern. Conf. on Fusion energy. Lyon, France, 2002, pp. 1—5.
2. **Mazzitelli G. et al.** Review of FTU results with the liquid lithium limiter. — Fusion Eng. Des., 2010, vol. 85, № 6, pp. 896—901.
3. **Mirnov S.V., Lazarev V.B.** Li experiments at the tokamak T-11M in field of steady state PFC investigations. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, № 1, pp. S417—S420.
4. **Ruzic D.N. et al.** Flowing liquid lithium plasma-facing components. Physics, technology and system analysis of the LiMIT system. — Nucl. Mater. Energy, 2017, vol. 12, pp. 1324—1329.
5. **Gasparyan Y.M. et al.** Deuterium release from Li—D films exposed to atmospheric gases. — Fusion Eng. Des., 2017, vol. 117, pp. 163—167.
6. **Krat S.A. et al.** Time-resolved studies of deuterium release from lithium films exposed to water vapor. — Fusion Eng. Des., 2017, vol. 124, pp. 333—337.
7. **Mirnov S.** Plasma-wall interactions and plasma behaviour in fusion devices with liquid lithium plasma facing components. — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, № 1, pp. 876—885.
8. **Mirnov S.V. et al.** Lithium experiment in tokamak T-11M and concept of limiter tokamak-reactor. — In: 21st IAEA Fusion Energy Conf. Chengdu, China, 2006, № 12, pp. 41—43.
9. **Mirnov S.V. et al.** Experimental test of the system of vertical and longitudinal lithium limiters on T-11M tokamak as a prototype of plasma facing components of a steady-state fusion neutron source. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, № 12, p. 123015.
10. **Sieglin B. et al.** Real time capable infrared thermography for ASDEX Upgrade. — Rev. Sci. Instrum., 2015, vol. 86, № 11, p. 0113502.
11. **Vondracek P. et al.** Fast infrared thermography on the COMPASS tokamak. — Fusion Eng. Des., 2017, vol. 123, pp. 764—767.
12. **Yang Z. et al.** Calculation of the heat flux on the first wall during disruption on tokamak. — J. Fusion Energy, 2017, vol. 36, № 1, pp. 15—20.
13. **Courtois X. et al.** Design and status of the new WEST IR thermography system. — Fusion Eng. Des., 2018, vol. 136, № September 2017, pp. 1499—1504.
14. **Rosenberg M., Smirnov R.D., Pigarov A.Y.** On thermal radiation from fusion related metals. — Fusion Eng. Des., 2009, vol. 84, pp. 38—42.

15. **Krat S.A. et al.** Deuterium release from lithium–deuterium films, deposited in the magnetron discharge. — Vacuum, 2014, vol. 105, pp. 111—114.
16. **Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Evtikhin V.A.** Application of lithium in systems of fusion reactors. 1. Physical and chemical properties of lithium. — Plasma Devices Oper. Taylor & Francis, 2009, vol. 17, № 1, pp. 42—72.
17. **Zhang Y. et al.** Research on the normal spectral band emissivity of tungsten between 150 and 500 °C. — Rev. Sci. Instrum. American Institute of Physics, 2018, vol. 89, № 10, p. 10J126.
18. **Lunner O., Kurlbaum F.** Der electrisch geglühte «absolut schwarze» Körper und seine Temperaturmessung. — Verhandlungen der Dtsch. Phys. Gesellschaft, 1898, vol. 17, pp. 106—111.
19. **Pérez-Sáez R.B., del Campo L., Tello M.J.** Analysis of the accuracy of methods for the direct measurement of emissivity. — Intern. J. Thermophys., 2008, vol. 29, № 3, pp. 1141—1155.
20. **Blokh A.G.** Fundamentals of the heat exchange by radiation. — M.: Gosenergoizdat, 1962. 332 p. (in Russian).
21. **Parker W.J., Abbott G.L.** Theoretical and experimental studies of the total emittance of metals. — In: Symposium on Thermal Radiation of Solids. Ed. Katzoff S. — San-Francisco: Scientific and Technical Information Division, NASA, 1964, pp. 11—28.
22. **User's manual FLIR A6xx series.**
23. **Kutateladze S.S.** Fundamentals of the heat exchange theory. — Atomizdat, 1979. 416 p. (in Russian).
24. **Barus C.** Bemerkungen über die Schmidtsche Theorie der Phosphoremanation. — Ann. Phys. John Wiley & Sons, Ltd, 1903, vol. 316, № 8, pp. 1142—1144.
25. **Subbotin V.I. et al.** Lithium. — M.: IzdAT, 1999. 262 p. (in Russian).
26. **Golubeva I L., Sagadeev V.V.** Heat radiation of hard and liquid metals. — Vestnik tekhnologicheskogo universiteta (Herald of technological university), 2017, vol. 20, № 2, pp. 31—32 (in Russian).
27. **Fiflis P. et al.** Wetting properties of liquid lithium on select fusion relevant surfaces. — Fusion Eng. Des., 2014, vol. 89, № 12, pp. 2827—2832.

AUTHORS

Pricshivichin A.S. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Krat S.A. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; stepan.krat@gmail.com

Harina A.P. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Picarev A.A. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Received 4 March 2019

Revised 22 March 2019

Accepted 26 March 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 2, pp. 89—95