

УДК 621.039.6

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА МОДЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

*Б.И. Хрипунов, В.Б. Петров, С.Н. Корниенко, А.М. Муксунов, А.С. Рупышев, В.В. Шапкин
(Институт ядерного синтеза, РНЦ «Курчатовский институт»)*

В работе приведен краткий обзор исследований взаимодействия мощного стационарного потока плазмы с материалами термоядерного реактора. Исследования проведены на установках ЛЕНТА и СПРУТ-4 с прямым магнитным полем в Институте ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт». Работа включает эксперименты с плазменным потоком, проходящим через газовую мишень (моделирование «отрыва» в диверторе), изучение эрозии, перепыления материалов, обращенных к плазме, а также новые решения по компонентам первой стенки (литиевой стенки). Плазма генерируется электронным пучком (пучково-плазменный разряд — ППР). Исследование физики явлений на краю плазмы и реакции материалов на высокие потоки частиц и тепла основано на больших потенциальных возможностях ППР для изучения материалов благодаря соответствию условий пристеночному слою токамака. Материалы изучались под воздействием дейтериевой плазмы. При больших ионных дозах (10^{26} ион/м²) изучены эрозия, перепыление и смешивание углеродных материалов и вольфрама. Обнаружена повышенная эрозия вольфрама при высоких температурах в области энергии ионов, намного меньше порога распыления. На поверхности происходило образование субмикронных структур. Смешивание вольфрама и углерода приводило к образованию карбида вольфрама. Жидколитиевая поверхность была создана с помощью капиллярно-пористых структур. Изучена эмиссия лития с поверхности жидкого металла. Приведено сравнение полученных результатов с результатами других групп (PISCES, T-11M).

Ключевые слова: первая стенка, углеграфитовые материалы, вольфрам, литий, дейтерий, плазма, эрозия.

RESEARCH OF STEADY-STATE PLASMA INTERACTION WITH FUSION MATERIALS ON SIMULATOR DEVICES. B.I. KHRI-PUNOV, V.B. PETROV, S.N. KORNIENKO, A.M. MUKSUNOV, A.S. RUPYSHEV, V.V. SHAPKIN. A short review of experimental research on interaction of a high-power stationary plasma stream with fusion reactor materials is presented. The research has been carried out on linear plasma simulators at Nuclear Fusion Institute PPC «Kurchatov Institute» LENTA and SPRUT-4. The scope of the experimental work includes: plasma stream in a neutral a gas target (divertor detachment simulation), erosion and redeposition of plasma-facing materials, new solutions for high-heat flux plasma-facing components (lithium wall). A beam-generated plasma (beam-plasma discharge — BPD) is used for investigation of boundary physics and of material response to high particle and heat fluxes basing on the high potential of the BPD for material research due to the similarity of the conditions to the tokamak scrape-off-layer. Deuterium plasma impact on plasma facing materials has been investigated. Erosion, hydrogen retention, redeposition and mixing effects were studied at high ion doses (10^{26} ion/m²) for carbon materials and tungsten. Increased tungsten erosion at high surface temperature has been found for the ion energies far below the threshold for sputtering. Development of sub-micron structures has been detected on the surface. Mixing of W and C resulted in tungsten carbide formation. Liquid lithium surface was made with a capillary porous structure. The lithium emission from the liquid metal surface has been studied. Comparison of the obtained results is given with the results of other research teams (PISCES, T-11M).

Key words: first wall, carbon-based materials, tungsten, lithium, deuterium, plasma, erosion.

Материалы, предназначенные для облицовки камеры в установках термоядерного синтеза, будут находиться в контакте с плазмой и подвергаться облучению потоками частиц и излучения, приводящему к изменению (деградации) их свойств и ограничению, таким образом, времени жизни компонентов реактора, обращенных к плазме. Наряду с исследованиями, проводящимися на крупных реакторных установках типа токамак, для экспериментального изучения пристеночных процессов и воздействия плазмы на материалы широко применяются плазменные модельные установки с прямым магнитным полем. Стационарный характер действия и соответствие параметров плазмы пристеночному слою (SOL) и дивертору токамака дают возможность создавать в них экспериментальные условия, необходимые для исследования и разработки материалов термоядерного реактора, обращенных к плазме.

В течение последнего десятилетия материалы термоядерного реактора интенсивно изучаются в РНЦ «Курчатовский институт» на плазменных установках ЛЕНТА и СПРУТ-4. В основе действия этих установок с прямым магнитным полем лежит принцип генерации плазмы с помощью электронного пучка, или так называемого пучково-плазменного разряда (ППР). Два основных вида ППР, применявшихся в работах по исследованию материалов, — это ППР в магнитном поле и ППР в скрещенных электрическом и магнитном полях. Продольное магнитное поле обычно составляет 0,1—0,4 Тл, мощность инжектора 1—25 кВт, плотность плазмы 10^{11} — $5 \cdot 10^{13}$ см⁻³, электронная температура 0,5—30 эВ. Эксперименты проводились по следующим направлениям: исследование взаимодействия плазменного потока с газовой мишенью (моделирование газового дивертора); испытание материалов (углеграфитовых и с высоким Z) в условиях, близких к диверторным; эрозия, перепыление, накопление изотопов водорода, смешивание материалов, исследование перспективных материалов покрытия (лития).

Важнейшей проблемой во взаимодействии плазмы со стенкой является проблема большого энерговыделения как в стационарных условиях (до 10 МВт/м² и более), так и при срывах и в других переходных режимах, например, при ELM-событиях (≥ 65 МДж/(м²с^{1/2})). В данной работе мы рассматриваем материалы, подвергаемые воздействию плазмы с высокой стационарной мощностью при низкой энергии бомбардирующих ионов, что отвечает условиям вблизи приемной пластины в диверторе с инъекцией нейтрального газа (так называемом газовом диверторе). Ионы будут иметь энергию от нескольких единиц электрон-вольт до десятков электрон-вольт, а повышенная температура поверхности будет иметь место из-за большой средней мощности (например, в интервалах между ELM-событиями). Для изучения материалов в таких условиях используется специфическая особенность установок с ППР — наряду с энергией плазмы для повышения температуры облучаемой поверхности используется энергия электронного пучка. Удельная мощность потока в наших экспериментах доходила до 25 МВт/м², что намного превышает уровень, обычно достижимый в экспериментах, проводимых в стационарных условиях.

В работе приводятся некоторые данные, полученные при изучении эрозии вольфрама, углеродных материалов, смешивания W + C и лития.

На предварительном этапе проводилось моделирование газового дивертора в потоке плазмы, проходящем через газовую мишень [1]. Экспериментально были получены различные режимы, соответствующие условиям в диверторе токамака, включая режим «отрыва» плазмы при давлении в области газовой мишени до 0,1 торр. В этих условиях проводились исследования материалов на основе вольфрама и углерода. Образцы подвергались экспозиции в дейтериевой плазме вблизи состояния отрыва. На рис. 1 показано облучение графитового образца в плазме. Температура поверхности образца-мишени в горячем пятне составляла 1000—1600 К.

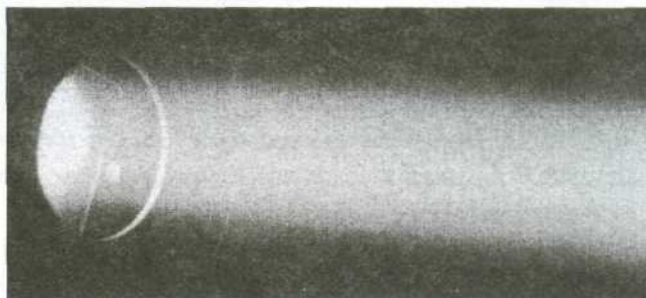


Рис. 1. Графитовый образец в дейтериевой плазме

ВОЛЬФРАМ

Вольфрам является кандидатным материалом в качестве покрытия элементов дивертора в реакторе ИТЭР. Вольфрам имеет высокий порог физического распыления, а его эрозия, как предполагается, будет иметь место только при срывах. Для предотвращения напыления углерода (и бериллия) на вольфрамовое

покрытие температуру последнего предполагается поддерживать на уровне 773—1473 К. Однако мы наблюдали распыление образцов вольфрама W—4%Mo в стационарной дейтериевой плазме при температуре выше 1270 К при низких (подпороговых) значениях энергии ионов ~ 5 —10 эВ (порог распыления вольфрама ионами дейтерия составляет ~ 180 эВ). Были получены значения коэффициента распыления вольфрама $1,5 \cdot 10^{-4}$ ат./ион, что обычно наблюдается при энергии дейтронов 250 эВ [2]. Для проверки этих наблюдений были испытаны четыре различных вольфрамовых материала: W—1%BaO₃, W—13%I, W—10%Re и монокристаллический W (111). Образцы этих материалов экспонировались в плазме с плотностью потока $1,1 \cdot 10^{22}$ м⁻²·с⁻¹ в диапазоне температур поверхности 1300—1600 К. Образцы подверглись последовательному облучению до двух значений дозы $F_1 = 1,5 \cdot 10^{26}$ ион/м² и $F_2 = 2,8 \cdot 10^{26}$ ион/м². Таким образом, суммарная доза составила $F = 4,3 \cdot 10^{26}$ ион/м². После каждого облучения по убыли веса был определен коэффициент распыления для каждого исследуемого образца. Эффект эрозии был обнаружен на всех образцах. Подпороговое распыление вольфрама ионами D⁺ с энергией ~ 5 —10 эВ имело место для всех исследуемых марок вольфрама. Наименьшее значение ($1,7 \cdot 10^{-5}$ ат./ион) наблюдалось в случае монокристаллического вольфрама W (111), а наибольшее ($4,2 \cdot 10^{-5}$ ат./ион) — для вольфрама с добавкой La₂O₃. Коэффициент подпорогового распыления для всех исследовавшихся материалов уменьшается с ростом дозы облучения. Кроме того, наблюдалось изменение микроструктуры поверхности, и на поверхности всех марок вольфрама возникала ячеистая субмикронная структура. Это видно на рис. 2, который показывает микроструктуру поверхности образца W—10%Re после его экспозиции в плазме. Большинство ячеек примерно на два порядка величины меньше,

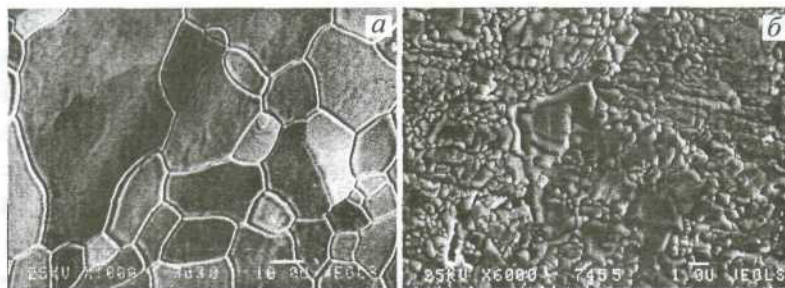


Рис. 2. Микроструктура поверхностей необлученного поликристаллического вольфрама, выявленного химическим травлением (а), и W—10%Re после его экспозиции в дейтериевой плазме ($4,3 \cdot 10^{26}$ ион/м²) при 1470 К (б)

чем обычные зерна W (150—300 нм вместо 10—40 мкм). После облучения до дозы $4,3 \cdot 10^{26}$ м⁻² при 1520 К образцы вольфрама содержали в слое толщиной 20 нм менее 0,05% ат. дейтерия. Для объяснения распыления вольфрама в подпороговой области энергий при высокой температуре поверхности и образования структуры ранее была предложена теоретическая модель, рассматривающая распыление атомов с поверхности и их регенерацию [2].

УГЛЕРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

• Наиболее серьезной проблемой термоядерного реактора, связанной с использованием углеродных материалов, является накопление трития, связанное, главным образом, с химической эрозией. Мы исследовали графит отечественного производства МПГ-8 и кандидатный композитный материал SEP NB 31, предлагаемый для реактора ИТЭР. Химическая эрозия этих материалов имела место при различных энергиях ионов, включая диапазон низких энергий 5—20 эВ [3]. Коэффициент эрозии, измеренный при температуре 1000—1200 °С, составил $1,7 \cdot 10^{-2}$ ат./ион для МПГ-8 и $0,9 \cdot 10^{-2}$ ат./ион для композитного материала SEP NB 31. Подобные измерения на тех же материалах были сделаны при температуре поверхности на холодной, близкой к комнатной. Коэффициент распыления хотя и снизился на порядок величины, однако остался высоким и для МПГ-8 составил $1,1 \cdot 10^{-3}$ ат./ион. Во всех случаях эрозия сопровождалась генерацией молекулярных соединений угледейтеридов CD₄ и их продуктов ($M/e = 18, 16$ и 14), а также высших угледейтеридов C₂D₂ и других ($M/e = 20, 34, 36$).

МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМ Z И СМЕШИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ

В условиях наших экспериментов наблюдалось смешивание материалов с высоким Z с углеродными материалами [3]. Пример смешивания углерода с молибденом в результате распыления углеродного образца в дейтериевой плазме на молибденовом коллекторе, установленном рядом с плазменным шнуром,

приведен на рис. 3. На рисунке показаны распределения материалов в поверхностном слое, включая накопленный в нем дейтерий. Видно, что весь углерод находится в поверхностном слое толщиной 300 нм. В этом же перепыленном слое сосредоточен и накопленный дейтерий.

При одновременном распылении составной мишени из образцов вольфрама и графита также было обнаружено смешивание перепыленных материалов. Анализ состава перепыленного материала обнаружил свидетельства протекания химических процессов. Например, при сборе продуктов эрозии на холодной поверхности рядом с плазмой было показано, что происходит образование таких химических соединений, как карбид вольфрама (WC). На рис. 4 показан осажденный материал, полученный с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ). Этот материал методом электронной дифракции был идентифицирован как WC, причем размеры частиц находились в диапазоне 50–200 нм.

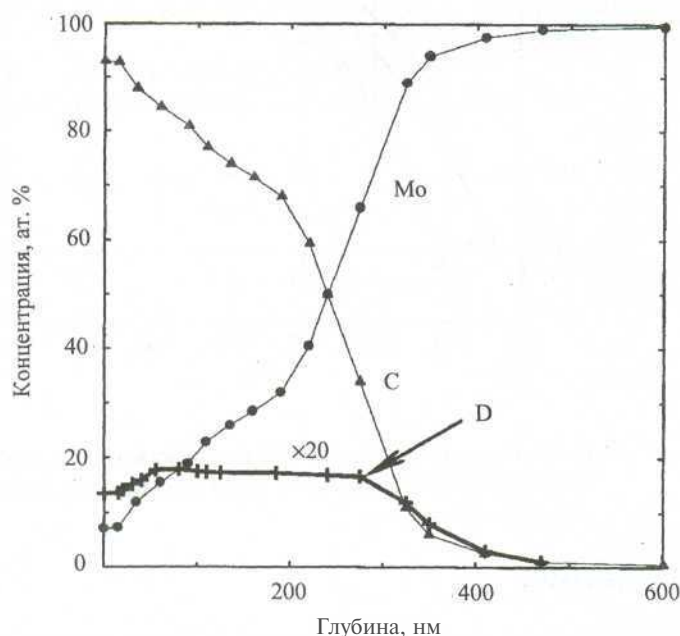


Рис. 3. Распределение материалов в перепыленном слое на поверхности молибденового коллектора, полученном при распылении углеродного образца в дейтериевой плазме

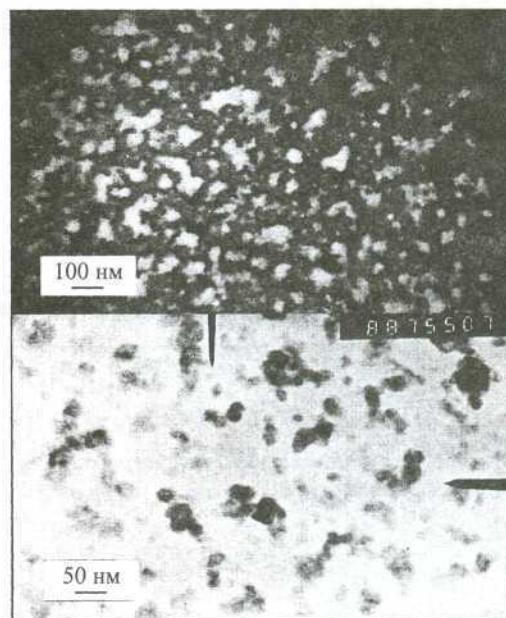


Рис. 4. Карбид вольфрама, полученный при распылении составной мишени из вольфрама и графита

ЛИТИЙ

В настоящее время все возрастающее внимание уделяется исследованию лития как материала, обращенного к плазме. На установке СПРУТ-4 проведены эксперименты с жидколитиевой поверхностью при энергетических нагрузках 1–25 МВт/м². В этих экспериментах на мишени поступал поток электронов с энергией 1–10 кэВ. Жидкая поверхность была сформирована с помощью капиллярно-пористой системы, заполненной литием. Оценка эффекта эрозии была проделана для условий, отвечающих облучению литиевой мишени электронным пучком и образованию литиевой плазмы у поверхности. Было обнаружено, что при температуре поверхности 400–900 °С основной механизм эрозии связан с испарением лития [4, 5]. Однако этот процесс не идет по традиционному пути, который характеризуется энергией активации $E_{исп} = 1,52$ эВ. Для определения энергии активации эмиссии лития в наших условиях был проведен анализ баланса энергии и массы в процессе облучения мишени, а также измерения температуры эмитирующей поверхности. Анализ линеаризованной температурной зависимости скорости эмиссии $\ln N(I/T)$ показал [6], что процесс имеет гораздо более низкое значение энергии активации $E^* = 0,53$ эВ по сравнению с испарением. На рис. 5 это значение приведено наряду с другими значениями, характеризующими эмиссию лития при испарении, а также полученными в других экспериментах с воздействием плазмы на поверхность жидкого лития. Снижение энергии активации эмиссии лития с поверхности является спецификой плазменных экспериментов и находит объяснение в распылении атомов с поверхности [7] аналогично тому, как это рассматривается при подпороговом распылении вольфрама. Сравнение соответствующей скорости эмиссии лития, полученной на плазменных установках, работающих с

литием, СПРУТ-4 (электронный пучок + плазма) и PISCES-B (для гелиевой и дейтериевой плазмы), показано на рис. 6 в зависимости от температуры поверхности.

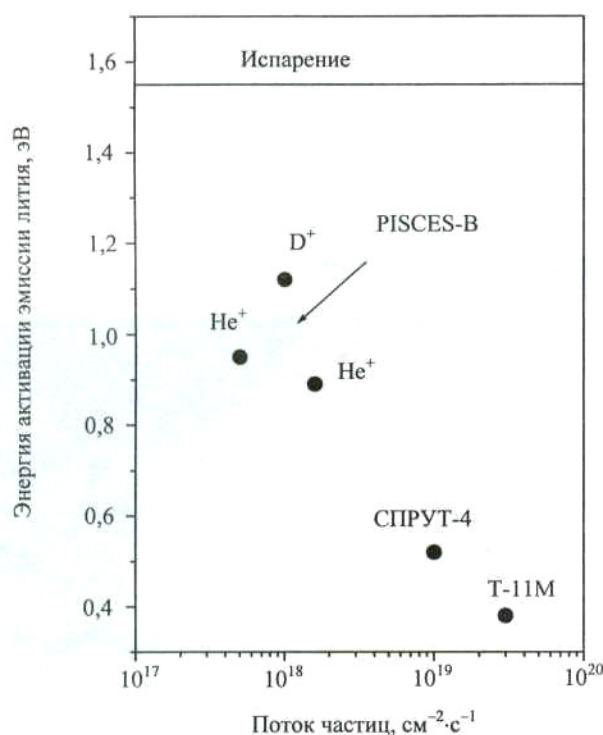


Рис. 5. Энергия активации эмиссии лития в различных плазменных экспериментах с литиевой поверхностью

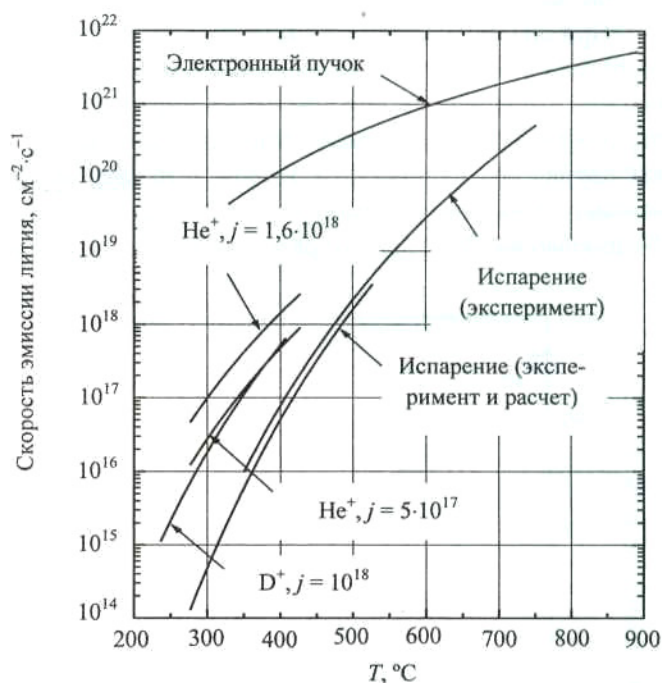


Рис. 6. Скорости эмиссии лития, полученные на установках СПРУТ-4 (верхняя кривая) и PISCES-B (для гелиевой и дейтериевой плазмы)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установках с прямым магнитным полем исследованы явления, связанные с взаимодействием плазмы с газом и твердой поверхностью¹, которые происходят в термоядерном реакторе. Стационарные плазменные потоки создавались с помощью пучково-плазменного разряда. Моделировались условия газового дивертора, в которых были проведены исследования материалов, обращенных к плазме.

В качестве материалов, обращенных к плазме, в исследование включены вольфрам, графитовые и композитные материалы, а также литий. Характерными условиями данных экспериментов были низкая энергия ионов 5–20 эВ и высокая температура поверхности — выше 1270 К.

Обнаружено подпороговое распыление поверхности вольфрама в дейтериевой плазме при температуре более 1270 К. Объяснение явления возможно с помощью механизма распыления адсорбированных атомов.

Показано, что химическая эрозия графитов и композитных материалов происходит при температуре поверхности, близкой к комнатной, с коэффициентом около 10^{-3} ат./ион, а также имеет место возрастание эрозии до $\sim 10^{-2}$ ат./ион с повышением температуры до 1200–1500 К.

Обнаружено смешивание углерода с W и Mo, а также накопление дейтерия в смешанном слое. Кроме того, высокая химическая активность компонентов, участвующих в процессе, приводит к образованию карбида вольфрама на поверхности коллектора.

Специфическая особенность эрозии лития выражается в снижении энергии активации процесса с 1,5 до 0,5 эВ/ат. Объяснение явления возможно на основе распыления адсорбированных атомов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 06-08-00975.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litnovsky A.M., Khripunov B.I., Sholin G.V., Petrov V.B., Shapkin V.V., Antonov N.V. Resonance radiation and high excitation of neutrals in plasma—gas interactions. — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290–293, p. 1107–1111.

- Гусева М.И., Гуреев В.М., Колбасов Б.Н., Коршунов С.Н., Мартыненко Ю.В., Петров В.Б., Хрипунов Б.И. Подпороговое распыление при высоких температурах. — Письма в ЖЭТФ, 2003, т. 77, вып. 7, с. 430—433.
3. Korshunov S.N., Guseva M.I., Gureev V.M., Danelyan L.S., Khripunov B.I. et al. Imitation of deuterium plasma interaction with surface of carbon materials in gaseous divertor conditions. — J. Nucl. Mater., 2003, vol. 313—316, p. 87—91.
 4. Khripunov B.I., Petrov V.B., Shapkin V.V., Pleshakov A.S., Rupyshev A.S., Antonov N.V., Prokhorov D.Yu., Shpansky Yu.S., Evtikhin V.A., Lyublinsky I.E., Vertkov A.V. Liquid lithium surface research and development. — Ibid., p. 619—624.
 5. Khripunov B.I., Petrov V.B., Shapkin V.V., Antonov N.V., Pleshakov A.S., Rupyshev A.S., Prokhorov D.Yu. Lithium surface operating under steady-state power load. — Fusion Engineering and Design, 2003, vol. 65, Issue 3, p. 449—454 (Special Issue 1st Intern. Workshop on Plasma-Interactive Components in Fusion Devices (1st IWIC-PIC). Osaka, Japan, May 23—25, 2002).
 6. Doerner R.P., Krashenninnikov S.I., Schmid K. — J. of Appl. Phys., 2004, vol. 95, № 8.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2008 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 24—31.