

УДК 533.95

ВЫБРОС ЧАСТИЦ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ С ПОВЕРХНОСТИ ФОЛЬГ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

В. Я. Никулин¹, П. В. Силин¹, Е. Н. Перегудова¹, И. В. Боровицкая²,
В. Н. Колокольцев², С. А. Масляев¹, Л. И. Кобелева², В. Ф. Дегтярев³,
А. И. Гайдар⁴

Целью работы являлось изучение выброса частиц ряда тугоплавких металлов W, Ti, V со свободной поверхности фольг при выходе на нее ударной волны. Выбор этих металлов обусловлен тем, что они являются наиболее перспективными материалами для создания вакуумных камер термоядерных реакторов. Обнаружен выброс мелких (< 1 мкм) и крупных (до 10 мкм) частиц с тыльной стороны металлических фольг. Ударные волны создавались импульсным воздействием на поверхность исследуемых металлических фольг высокоскоростных струй плотной плазмы с плотностью потока энергии $\leq 10^9$ Вт/см². Количество выброшенных частиц на единицу площади составило величину: для крупных частиц $\sim 10^{10}$ см⁻², а для мелких $\sim 10^9$ см⁻². Оценки интенсивности выброса пылевых частиц показывают, что этот процесс может привести к значительному загрязнению плазмы элементами с высоким атомным номером Z в термоядерных установках.

Ключевые слова: плазменный фокус, ударные волны, плазменные струи, выброс частиц, тугоплавкие материалы, УТС.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: nikulinvy@lebedev.ru.

² Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 119334 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 49.

³ Московский технический университет связи и информатики, 111024 Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 8а.

⁴ НИИ Перспективных материалов и технологий, 115054 Россия, Москва, ул. М. Пионерская, 12.

Введение. Известно, что при воздействии импульсов высокой энергии на металлические пластины наблюдается выброс частиц с обратной стороны, который объясняется выходом ударных волн (УВ) на свободную поверхность [1, 2]. Изучение этого явления на металлах показало, что на обратной стороне имеет место выброс не только крупных и мелких частиц материала, но и капель расплава [3, 4]. Механизм этого явления в настоящее время объясняется на основе теории неустойчивости Рихтмайера–Мешкова [5, 6], а также отрывом твердых пылевых частиц при разрушении поверхностного слоя твердого тела на фронте УВ [7, 8].

При использовании тугоплавких материалов в элементах конструкций вакуумных камер установок термоядерного синтеза (УТС) обычно учитывается распыление материала при воздействии мощных потоков дейтериевой плазмы и ионов перезарядки с энергией $\sim 100\text{--}200$ эВ [9, 10]. Явлениям откольного характера, приводящим к формированию пылевого облака твердых частиц, уделяется значительно меньшее внимание. В то же время выброс твердых частиц и капельных фракций при воздействии УВ на элементы конструкций в вакуумной камере может оказывать заметное влияние на параметры плазмы в УТС.

Целью работы являлось изучение выброса частиц ряда тугоплавких металлов W, Ti, V со свободной поверхности фольг при выходе на нее ударной волны, возникающей под воздействием мощных импульсных плазменных струй, генерируемых в установке типа плазменный фокус. Выбор W, Ti, V для исследования обусловлен тем, что они являются в настоящее время наиболее перспективными материалами для конструкции вакуумных камер УТС [9, 10].

Методика эксперимента. Облучение фольг из тугоплавких металлов W, Ti, V плазменными струями выполняли на электроразрядной установке типа плазменный фокус с коаксиальными электродами (рис. 1(а)) Мейзеровского типа (ПФ-4, ФИАН) [11]. Запасенная энергия в конденсаторной батарее составляла 3.5 кДж, длительность воздействия плазменной струи ≤ 100 нс, скорость плазменной струи $\geq 10^7$ см/с, электронная плотность плазмы в струе $10^{18} - 10^{19}$ см⁻³, плотность потока энергии в плазменном импульсе $\leq 10^9$ Вт/см². Рабочими газами были азот и аргон [11].

Образцы металлических фольг W, Ti, V имели размеры $\sim 20 \times 20$ мм при толщине от 0.15 до 1.0 мм. Фольги после прокатки не отжигались. Поверхность фольг обрабатывалась мелкой шлифовальной бумагой. Перед облучением плазмой фольги обезжиривались, протравливались в слабом растворе азотной кислоты и промывались в дистиллированной воде. Затем они устанавливались в специальном держателе образцов,

вводимом на штоке в разрядную камеру установки ПФ-4 (рис. 1(б)). Металлические фольги плотно прижимались к держателю образцов диафрагмой с отверстием $\varnothing 15$ мм. Облучение образцов выполняли на расстоянии 3 см от анода установки.

Металлические частицы, выброшенные с обратной стороны фольги, осаждались на стеклянные пластинки размером $\sim 20 \times 20$ мм толщиной 1.5 мм, размещаемые на расстоянии 5 мм от поверхности обратной стороны фольги. Хорошая адгезия осажденных на стеклянной пластинке стекла частиц обеспечивалась их высокой скоростью выброса.

Контроль размеров частиц на поверхности стеклянных пластинок выполняли на оптическом микроскопе Leica DM ILM (Германия) с автоматической регистрацией размеров частиц. Минимальный размер частиц, который можно было измерить, составлял ~ 0.3 мкм.

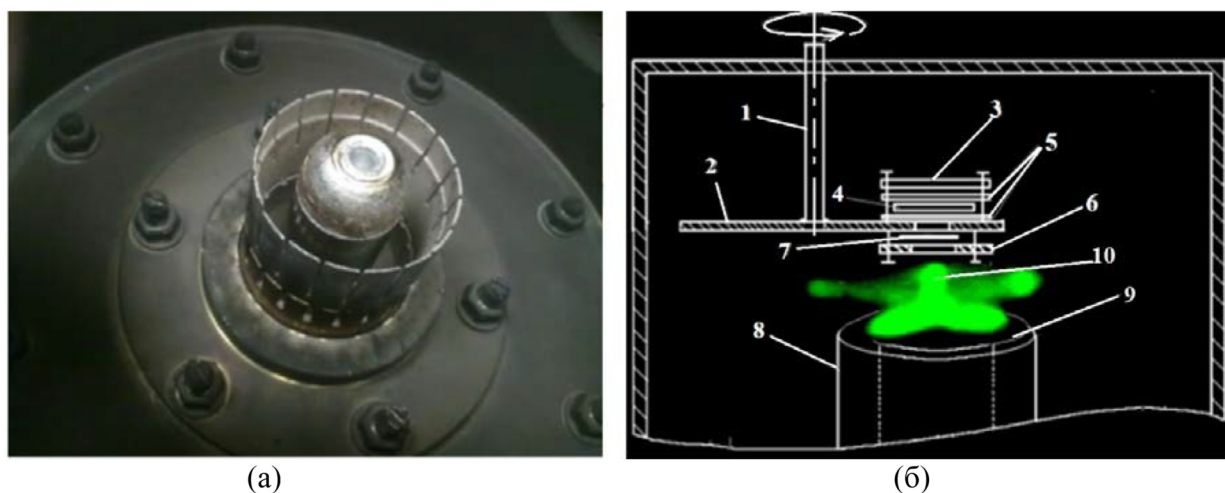


Рис. 1: (а) Фотография электродов установки ПФ. (б) схема эксперимента ударно-волнового воздействия плазменной струи на металлические фольги: 1 – шток держателя образцов; 2 – металлический диск толщиной 5 мм с отверстиями $\varnothing 15$ мм; 3 – прижимная металлическая пластинка; 4 – стеклянная пластинка; 5 – мягкие прокладки; 6 – металлическая диафрагма с отверстием $\varnothing 15$ мм; 7 – металлическая фольга; 8 – катод; 9 – анод, 10 – плазменная струя.

Для контроля химического состава и морфологии осажденных частиц были выполнены аналогичные эксперименты с использованием в качестве подложки полированной пластины из алюминия с последующими исследованиями на сканирующем электронном микроскопе EVO 40 фирмы Zeiss, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа.

Измерение спектров пропускания стеклянных подложек с осажденными частицами металлов в области длин волн 0.35–1.0 мкм выполняли на спектрофотометре СФ-46 при 300 К.

Результаты эксперимента. На рис. 2 показана область осаждения пылевых частиц V и Ti на стеклянной пластинке при воздействии 5 импульсов аргоновой плазмы на фольги толщиной 0.16 мм (V) и 0.9 мм (Ti). Видно, что помимо мелких частиц от поверхности металлических фольг могут отрываться крупные частицы размером в десятые доли миллиметра, которые при столкновении с поверхностью стеклянной пластинки вызывают ее разрушение (рис. 2(б)). Аналогичная картина наблюдается при выбросе частиц от других фольг.

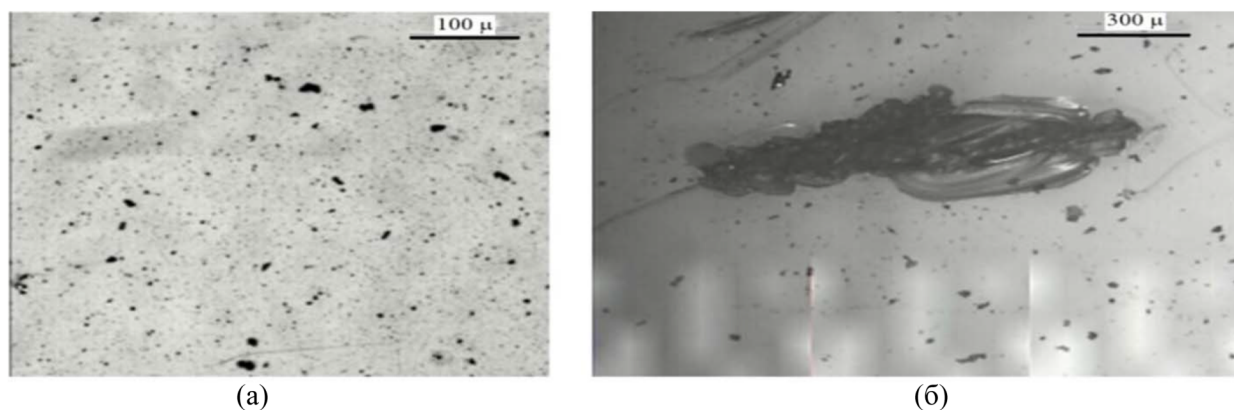


Рис. 2: Стеклянная пластинка с осажденными частицами V (а) и Ti (б) после воздействия 5 импульсов аргоновой плазмы.

Контрольные измерения химического состава осажденных частиц показали, что частицы металлов соответствуют материалу фольг. На рис. 3 приведены некоторые изображения частиц ванадия, осажденных на Al подложку с обратной стороны V фольги толщиной 0.16 мм. Рентгеноспектральный анализ частиц показал, что их состав соответствует чистому ванадию (рис. 3(е)), а форма частиц указывает на то, что их отрыв от ванадиевой фольги происходил в твердом состоянии.

На рис. 4 показаны оптические спектры пропускания стеклянных пластинок с осажденными частицами – W, Ti и V после облучения аргоновой и азотной плазмой. Как видно из представленных результатов все спектры пропускания имеют подобный вид. Однако в ближней инфракрасной области спектра имеются заметные различия в коэффициентах пропускания. Видно, что при сравнимых условиях облучения плазмой,

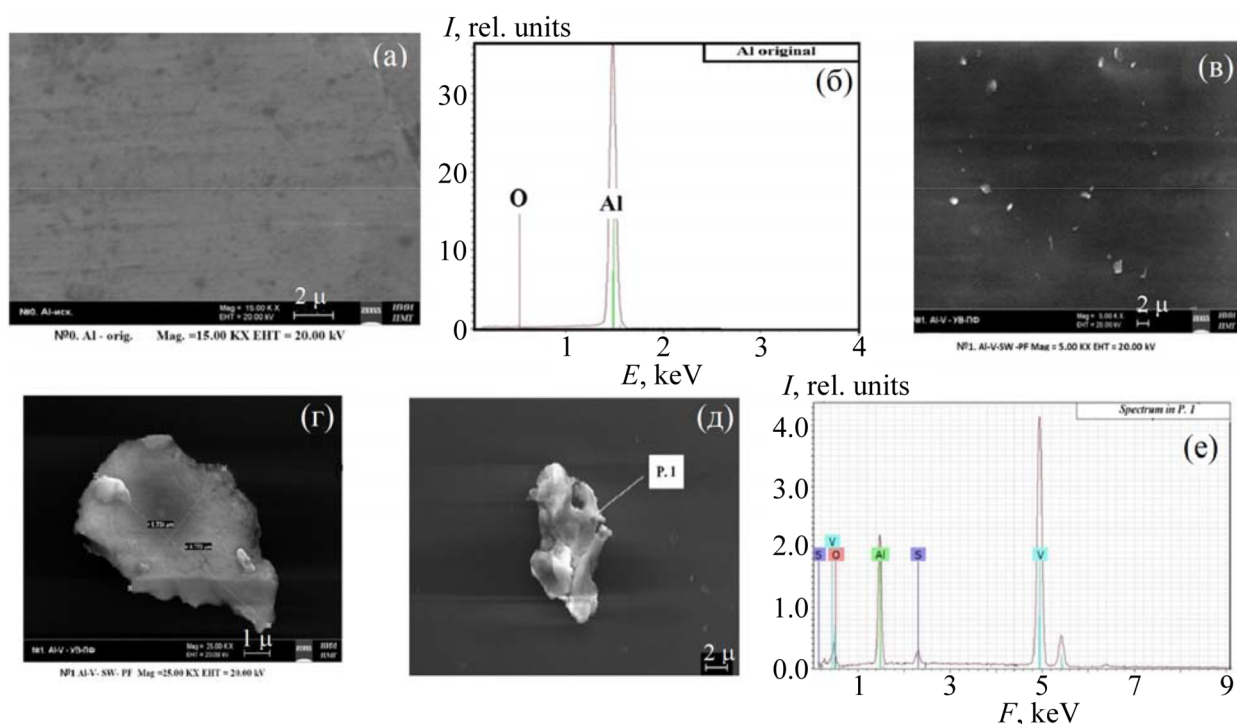


Рис. 3: Микрочастицы ванадия, осажденные на алюминиевую подложку со свободной поверхности фольги толщиной 0.16 мм при воздействии 5 импульсов аргоновой плазмы. (а) поверхность исходной алюминиевой подложки; (б) рентгеновский спектр с ее поверхности; ((в), (г), (д)) частицы ванадия на поверхности подложки; (е) рентгеновский спектр в области частицы, показанной на рис. 3(д).

наименьшее поглощение наблюдается на пластинках с осажденными частицами V и наибольшее – на пластинках с частицами W.

В области коротких длин волн < 0.35 мкм наблюдается характерное уменьшение пропускания для всех фольг, связанное с поглощением квантов света свободными электронами в металлических частицах. В широкой области длин волн ~ 0.3 – 1.0 мкм наблюдается преобладающее влияние диффузного рассеяния света на крупных и мелких частицах металла. Как видно из гистограмм (рис. 5), размеры частиц лежат в интервале от 0.3 до 10 мкм и более. Выброс крупных частиц 1–10 мкм преобладает из толстых (≤ 1 мм) фольг – Ti и W, а для тонкой (≤ 0.2 мм) фольги V в основном наблюдается выброс мелких частиц размером < 1 мкм. Число крупных частиц W, Ti на единицу поверхности составляло $\sim 10^{10}$ см $^{-2}$, для мелких частиц V $\sim 10^9$ см $^{-2}$. Таким образом, при размерах частиц много больше длины волны света 0.3–1.0 мкм характер спектров пропускания можно связать с диффузным рассеянием света.

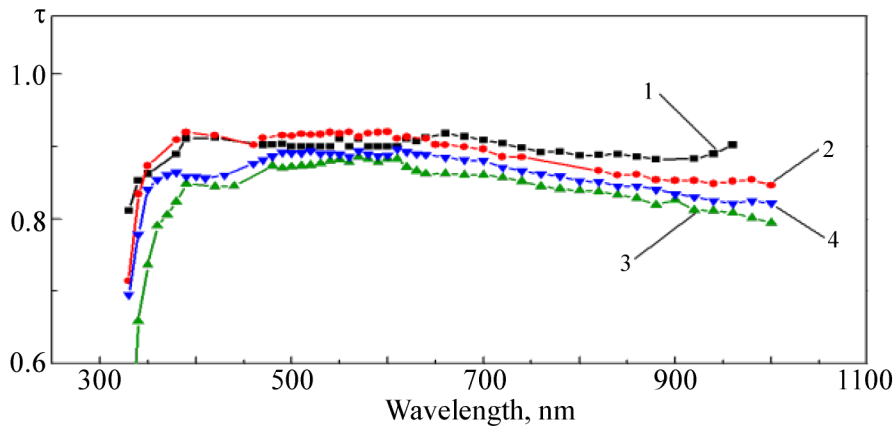


Рис. 4: Спектры пропускания стеклянных пластинок с осажденными частицами металла после воздействия 5 импульсов плазмы на фольги: *W*, *Ti* (аргоновая плазма); *V* (азотная плазма). 1 – исходное стекло; 2 – стекло с частицами *V*; 3 – *W*; 4 – *Ti*. Толщина фольг (мм): *V* – 0.16, *W* – 0.6, *Ti* – 0.9.

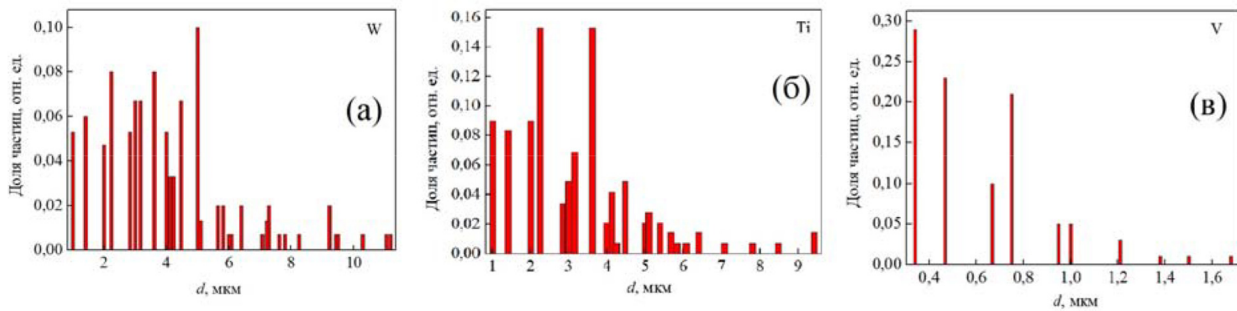


Рис. 5: Гистограммы распределения частиц металлов: *W*, *Ti* и *V*, осажденных на стеклянные пластинки, при облучении 5 импульсами аргоновой плазмы (*W*, *Ti*) и азотной плазмы (*V*). Толщина фольг: *W* – 0.6 мм; *Ti* – 0.9 мм; *V* – 0.16 мм.

Обсуждение результатов. Наблюдаемую зависимость размеров частиц при инъекции с поверхности фольг от толщины можно объяснить воздействием УВ при ее выходе на свободную поверхность фольг. В работе [12] было показано, что при плотности потока энергии $\sim 10^9$ Вт/см² и длительности импульса плазмы ~ 100 нс акустическая волна в *W* и *Ti* превращается в ударную волну соответственно на глубине ~ 0.6 мм и > 1 мм. В нашем случае эти условия выполняются для фольг *W* и *Ti* и, таким образом, выброс крупных частиц *W* и *Ti* можно связать с выходом УВ на заднюю поверхность фольги. Эти соображения подтверждаются выбросом более мелких частиц размером ~ 0.3 –

1.0 мкм на тонкой фольге V, где глубина формирования УВ согласно [12] составляет $\sim 0.4\text{--}0.5$ мм. При толщине фольги, равной 0.16 мм, УВ не успевает сформироваться из-за малой толщины материала и на поверхность фольг выходит менее интенсивная акустическая волна с пологим передним фронтом. Таким образом, спектры пропускания в ближней инфракрасной области позволяют качественно судить о формировании УВ и инжекции крупных частиц (W, Ti) и, наоборот, мелких частиц V, влияние которых на спектры пропускания более существенно в коротковолновой области спектра 0.3–0.5 мкм.

Из представленных результатов видно, что выброс частиц W, Ti и V с поверхности фольг существенно зависит от энергии УВ, длительности воздействия плазменного потока и толщины металлических фольг. Наибольшее снижение коэффициента пропускания стекол с осажденными частицами наблюдается для W и, в меньшей степени, для V. Это значит, что при сравнимых условиях воздействия плазмы с поверхности пластин W будет выбрасываться больше пылевых частиц, чем с пластин V.

Следует отметить, что на переднюю поверхность может выходить волна разгрузки, амплитуда которой может быть сравнима с амплитудой УВ. В этом случае в вакуумной камере термоядерного реактора с передней поверхности навстречу плазме будут выбрасываться крупные и мелкие частицы. Так, в работе [13] наблюдали выброс микрочастиц (фрагментов поверхности) произвольной формы размером от ~ 1 мкм до нескольких десятков мкм с передней поверхности ванадиевой пластины, облученной на установке ПФ, в зоне, где оплавления не наблюдалось. В термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы в стационарном режиме работы нет условий для формирования УВ. Однако при пусконаладочных работах и срывах тока плазма кратковременно касается защитных покрытий вакуумной камеры и других конструктивных элементов внутри камеры. В эти моменты плотность мощности на поверхности материалов конструкции камеры может превышать $10^8 - 10^9$ Вт/см² [9, 10].

В данной работе обращено внимание на возможность существования дополнительного ударно-волнового механизма пылеобразования в вакуумных камерах ТЯР, наряду с уже известными – распылением материала первой стенки ионами перезарядки с энергией 100–200 эВ и испарением материала защитных покрытий при воздействии мощных потоков плазмы. Для конструктивных материалов термоядерных установок с инерционным удержанием плазмы, работающих в импульсном режиме, выброс пылевых частиц под действием ударно-волновых эффектов может иметь еще более существенное значение.

Заключение. Обнаружен выброс мелких (< 1 мкм) и крупных (до 10 мкм) частиц с обратной стороны металлических фольг: W, Ti, V при выходе ударной волны на свободную поверхность фольг под воздействием плазменных струй азотной и аргоновой плазмы с плотностью потока энергии $\leq 10^9$ Вт/см², создаваемых на установке Плазменный фокус. Количество крупных частиц на единицу площади составляет $\sim 10^{10}$ см⁻², мелких частиц – $\sim 10^9$ см⁻². Из анализа спектров пропускания стеклянных пластинок с осажденными частицами W, Ti, V следует, что наибольший выброс крупных частиц наблюдается для W, наименьший выброс – для фольг V. Оценки интенсивности выброса пылевых частиц при импульсном воздействии концентрированных потоков энергии показывают, что этот процесс может приводить к существенному загрязнению плазмы элементами с высоким атомным номером Z в установках термоядерного синтеза за счёт выброса металлических частиц из конструкционных материалов первой стенки, диверторного узла и других элементов конструкции ТЯР.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10351), в части проведения экспериментов на установке Плазменный фокус и анализа результатов, и государственного задания № 075-00947-20-00, в части проведения рентгеноспектральных исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] H. D. Stein and H. J. Pfeifer, *Appl. Opt.* **11**(2), 305 (1972). DOI: 1364/AO.11.000305.
- [2] J. R. Asay and L. M. Barker, *J. Appl. Phys.* **45**, 2540 (1974).
<https://DOI.org/10.1063/1.1663627>.
- [3] L. I. Ivanov, A. I. Dedyurin, I. V. Borovitskaya, et al., *J. of Physics* **61**(6), 1179 (2003).
<https://www.ias.ac.in/describe/article/pram/061/06/1179-1185>.
- [4] C. S. Speight, L. Harper, and V. S. Smeeton, *Rev. Sci. Instr.* **60**, 3802 (1989).
<https://DOI.org/10.1063/1.1140443>.
- [5] A. B. Georgievskaya and V. A. Raevsky, *Journal of Dynamic Behavior of Materials* **3**(2), 321 (2017). DOI 10.1007/s40870-017-0118-2.
- [6] А. Л. Михайлов, В. А. Огородников, В. С. Сасик и др., *ЖЭТФ* **145**(5), 892 (2014). DOI: 10.7868/S0044451014050127.
- [7] Э. Э. Лин, А. Л. Михайлов, В. Н. Хворостин, *Письма в ЖЭТФ* **42**(15), 67 (2016).
<https://DOI.org/10.1134/S1063785016080125>.

- [8] Г. В. Сергиенко, А. В. Недоспасов, Н. М. Зыкова, Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез, № 3, 10 (2007). <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33276182>.
- [9] И. М. Позняк, Н. И. Архипов, С. В. Карелов и др., Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез (2014), № 1, 70-79. <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33990208>.
- [10] С. Н. Полухин, А. Е. Гурей, В. Я. Никулин и др., Физика плазмы **46**(2), 99 (2020). DOI: 10.31857/S0367292120020080.
- [11] С. А. Масляев, Физика и химия обработки материалов № 5, 5 (2013). https://elibrary.ru/download/elibrary_20357443_72856576.pdf.
- [12] И. В. Боровицкая, В. Н. Пименов, В. А. Грибков и др., Структурные изменения поверхности образцов ванадия под воздействием импульсных потоков высокотемпературной дейтериевой плазмы и ионов дейтерия № 6, 30 (2017).

Поступила в редакцию 26 августа 2020 г.

После доработки 27 сентября 2020 г.

Принята к публикации 28 сентября 2020 г.