УДК 538.971

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА НИУ «МЭИ» ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В.П. Будаев^{1,2,3}, С.Д. Федорович¹, М.В. Лукашевский¹, Ю.В. Мартыненко^{1,2,4}, М.К. Губкин¹,
А.В. Карпов^{2,4}, А.В. Лазукин^{1,5}, Е.А. Шестаков^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁵ОА НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия

Плазменная установка НИУ «МЭИ» предназначена для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения, в том числе для испытаний материалов в обеспечение отечественной программы создания термоядерного реактора (ТИН и ДЕМО) и международного термоядерного реактора ИТЭР. Установка представляет собой плазменную ловушку с линейной мультикасповой конфигурацией магнитного поля со стационарным плазменным разрядом с параметрами плазмы, обеспечивающими возможность мощной плазменно-тепловой нагрузки, ожидаемой на материалы в стационарных режимах термоядерного реактора. В экспериментах планируется разработать новую технологию создания высокопористой структуры поверхности тугоплавких металлов, в том числе так называемый вольфрамовый «пух» с размером пор и нановолокон ~50 нм, обладающих новыми физико-химическими свойствами, что представляет значительный интерес для ядерных, химических, энергетических, биомедицинских технологий.

Ключевые слова: установки с магнитным удержанием плазмы, плазменно-тепловые испытания материалов, материалы термоядерного реактора, вольфрам, молибден, наноструктурированная поверхность, ИТЭР, нанотехнологии.

PLASMA DEVICE AT NRU «MPEI» FOR TESTING OF REFRACTORY METALS AND CREATION OF HIGHLY POROUS MATERIALS OF NEW GENERATION

V.P. Budaev^{1,2,3}, S.D. Fedorovich¹, M.V. Lukashevsky¹, Yu.V. Martynenko^{1,2,4}, M.K. Gubkin¹, A.V. Karpov^{2,4},
A.V. Lazukin^{1,5}, E.A. Shestakov^{1,2}

¹National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

²NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

³Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

⁵JSC RPA «CNIITMASH», Moscow, Russia

The plasma device at NRU «MPEI» has been constructed for testing of refractory metals and creating high-porosity materials of a new generation—for Russian thermonuclear reactors (FNS and DEMO) and the international thermonuclear experimental reactor ITER. The device is a plasma trap with a linear multi-cusp configuration of the magnetic field, a stationary plasma discharge and plasma parameters, which make possible the powerful plasma-thermal load expected for materials in stationary modes of a thermonuclear reactor. In the experiments, it is planned to develop a new technology for creating a highly roughened and highly porous structure of the refractory metals surface, including so-called tungsten «fuzz» with pore size and nanofibers of ~50 nanometers and new physical and chemical properties, which is of considerable interest for nuclear, energy, biomedical technologies technologies.

Key words: fusion devices with magnetic confinement of plasma, high heat plasma test of materials, materials of fusion reactor, tungsten, molybdenum, nanostructured surface, ITER, nanotechnologies.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-23-36

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии на материал экстремальных плазменно-тепловых нагрузок в последние годы обнаружены эффекты стохастической кластеризации поверхности с иерархической гранулярностью (статистическим самоподобием — фрактальностью) и формирование высоко развитой поверхности, т.е. поверхности с большой удельной площадью. Такая структура поверхности твёрдого тела наблюдается после воздействия плазмы на материалы в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы и других плазменных установках с высокотемпературной плазмой [1, 2] при плазменно-тепловых испыта-

ниях, где в процесс одновременно вовлечены множественные механизмы эрозии и переосаждения эродированного материала, плавления, движения и отверждения поверхностных слоёв на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров. Характерными свойствами структуры изменённой поверхности таких материалов являются статистическая неоднородность и многомасштабная инвариантность стохастической структуры, описываемая степенными законами (скейлингами). Масштабная инвариантность в структуре, процессы самоорганизации диссипативных структур на нано- и мезоуровне могут определять характеристики твёрдого тела на макроуровне. Такие материалы представляют интерес для использования в различных технологиях.

В настоящее время в мире функционируют лишь несколько уникальных плазменных установок со стационарным разрядом высокотемпературной (от ~ 3 до ~ 30 электронвольт) плазмы, удерживаемой магнитным полем (см. [1, 3] и ссылки): НАГДИС-2 (Япония), PISCES (США), AIT-PID (Япония), PSI (Европа), Лента (Россия), в которых плазма имеет параметры, близкие к параметрам периферийной плазмы в термоядерных установках типа токамак и стелларатор. Эти установки не могут обеспечить выполнение всего большого объёма исследований взаимодействия плазмы с материалами при мощных стационарных плазменно-тепловых нагрузках. Для испытаний материалов в обеспечение отечественной программы создания термоядерного реактора (ТИН и ДЕМО) и международного термоядерного реактора ИТЭР необходима плазменная установка со стационарным плазменным разрядом, имитирующим нагрузки на материалы первой стенки в термоядерном реакторе для выполнения исследований формирования стохастической наноструктурированной поверхности тугоплавких металлов и других материалов первой стенки. Необходимость получения и широкомасштабных исследований таких материалов привела к решению создать специализированную плазменную установку для испытаний материалов мощными стационарными плазменно-тепловыми нагрузками. Такие работы будут проводиться на плазменной установке НИУ «МЭИ», параметры которой, конструкция и задачи исследований излагаются в настоящей статье. Работы, проводимые на такой экспериментальной плазменной установке в НИУ «МЭИ», не имеющей аналогов в России, направлены на испытание материалов мощными плазменно-пучковыми нагрузками и на решение проблемы выявления механизмов поверхностной модификации наноструктуры материалов под действием мощных плазменно-пучковых потоков, приводящих к формированию на поверхности высокоразвитой и высокопористой стохастической структуры. Такие материалы (в том числе вольфрам, молибден, углеродные материалы и их композиты) востребованы для эксплуатации при экстремальных плазменно-пучковых нагрузках, в технологиях материалов нового поколения, в том числе для ядерных, химических и биомедицинских применений. Актуальность такой проблемы обусловлена развитием современных технологий, испытывающих потребность в тугоплавких материалах с высокопористой и высокоразвитой поверхностью.

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА

Общие характеристики плазменной установки. Плазменная установка НИУ «МЭИ» представляет собой линейную систему с мультикасповой схемой магнитного удержания плазмы. Установка предназначена для обработки материалов высокоэнергичными потоками стационарной горячей плазмы. Исследования на этой установке позволят продвинуться в понимании физики взаимодействия горячей плазмы с материалами, такими как вольфрам, молибден, сталь, материалы стенки и дивертора ИТЭР и др. Это позволит приступить к разработке принципиально новых подходов к созданию технологии материалов нового поколения, что представляет значительный интерес для материаловедения, термоядерных и ядерных технологий. Впервые планируется провести исследования взаимодействия высокотемпературной плазмы с металлической поверхностью, направленные на создание технологии получения высокопористой структуры поверхности тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден и другие, в том числе с поверхностной структурой типа «пух».

Параметры установки:

Продольное магнитное поле на оси, мТл . . .	До 6
Внутренний диаметр разрядной камеры, м . . .	0,16
Длина разрядной камеры, м . . .	0,72, камера снабжена водным контуром охлаждения, что обеспечивает стационарный режим разряда

Параметры стационарного плазменного разряда в установке:

Длительность, мин . . .	До 100 и более
Ток плазменного разряда, А . . .	До 30
Плотность плазмы, м^{-3} . . .	До 10^{18}
Электронная температура, эВ . . .	До 4 с фракцией горячих электронов до 30
Ионный поток из плазмы на металлический тестовый образец, $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. . .	До $3 \cdot 10^{21}$
Рабочий газ. . .	Гелий, аргон, дейтерий

Фото внешнего вида установки представлено на рис. 1.

б

Рис. 1. Внешний вид плазменной установки (а), разрядная камера с магнитной системой (б)

Разрядная камера и вакуумная система.

Плазменная установка состоит из двухсекционной водоохлаждаемой разрядной камеры цилиндрической геометрии (рис. 2), турбомолекулярного высоковакуумного насоса, вакуумной ловушки, форвакуумного насоса. Разрядная камера изготовлена из немагнитной нержавеющей стали. Длина камеры 0,72 м, внутренний диаметр 0,16 м. Разрядная камера имеет двустенную конструкцию с расходом холодной проточной воды до 9 л/мин, обеспечивающим эффективный отвод тепла от нагревателя катода и плазменного разряда.

Диагностические окна разрядной камеры (порты доступа), расположенные на боковой поверхности 7 на рис. 2 и в торце второй секции камеры (на рис. 2 торец не показан), обеспечивают доступ манипуляторов или диагностических зондов во внутренний объем разрядной камеры либо используются для оптического наблюдения разряда.

Внутри разрядной камеры расположены катодный 1 и анодный 5 узлы (см. рис. 2). Катодный узел состоит из шести брусков гексаборида лантана LaB_6 размером $7 \times 7 \times 50$ мм. Бруски LaB_6 закреплены с помощью ленты из тантала симметрично вдоль осевой линии вакуумной камеры, образуя шестигранную компактную конструкцию, обеспечивающую ток электронной эмиссии 20 А. Для нагрева брусков LaB_6 до температуры 1700 К используется нагреватель, изготовленный из танталовой проволоки. Между

Рис. 2. Разрядная камера и магнитная система установки: 1 — катод; 2 — экран катода; 3 — постоянные магниты; 4 — соленоид продольного магнитного поля; 5 — медный анод; 6 — стальное кольцо анода; 7 — диагностическое окно

внутренней стенкой вакуумной камеры и катодом расположен цилиндрический танталовый экран 2, который уменьшает отвод тепла от нагревателя катода, а также участвует в формировании плазменного пучка. Заземлённый медный анод 6 расположен в середине вакуумной камеры и имеет в центре отверстие диаметром 35 мм. Поверхность анода, обращённая к катоду, имеет коническую форму. Такая форма анода с отверстием позволяет уплотнить газ в области разряда в 2 раза и сформировать узкий газовый канал. Анод крепится с помощью стального кольца 6, приваренного к внутренней стенке камеры.

Рабочий газ (гелий, дейтерий, аргон) поступает из системы регулируемого напуска газа в зону катодного узла. Откачка разрядной камеры со стороны, противоположной катодному узлу, осуществляется турбомолекулярным высоковакуумным и форвакуумным насосами. Эффективная быстрота откачки вакуумной системы достаточна для получения давления гелия 0,4 Па в разрядной камере при натекании из системы напуска газа с объёмным расходом 1 см³/с (100 Па·л/с), обеспечивающим плазменный разряд с заданными параметрами плазмы.

Магнитная мультикасповая система. Магнитная система состоит из катушек с током, создающих продольное магнитное поле, и постоянных магнитов, формирующих магнитные каспы вдоль оси катушек (мультикасп 8-польный) и обеспечивающих устойчивость линейного разряда. Применяется схема удержания плазмы в линейной ловушке продольным магнитным полем, создаваемым катушкой с током, и системой радиальных магнитных полей, создающих каспы. Такая схема была предложена и реализована в экспериментах в 1960-х годах советскими физиками (см. работу [4] и ссылки). Схема продольных проводников, создающих продольные каспы, известна как схема с «палками Иоффе» по имени М.С. Иоффе, предложившего впервые использовать проводники с продольным током для обеспечения стабильности удержания плазмы. В нашей установке такие проводники заменены постоянными магнитами, создающими мультикасповую конфигурацию магнитного поля.

Продольное магнитное поле в разрядной (вакуумной) камере установки НИУ «МЭИ» создаётся катушкой соленоида, содержащего 50 витков. Витки размещены на внешней поверхности камеры и изготовлены из изолированного алюминиевого провода прямоугольного сечения 5×8 мм (см. рис. 2). Питание катушки продольного магнитного поля осуществляется внешним стабилизированным источником питания. Испытания катушки показали, что температура витков не превышала 60 °С при длительном токе в её проводнике до 100 А без охлаждения стенок камеры проточной водой. Наличие фланцев в зоне сочленения двух секций разрядной камеры, а также диагностического окна 7 обусловило неравномерность намотки провода вдоль разрядной камеры. В результате существует как неоднородность продольного магнитного поля вдоль оси симметрии, так и наличие радиального компонента магнитной индукции в зонах камеры, не лежащих на оси симметрии. Для получения точной информации о напряжённости и направлении магнитного поля использовалась комбинация экспериментальных и расчётных данных.

Поле соленоида на оси симметрии разрядной камеры, направление которого вдоль оси обеспечено геометрией намотки на цилиндрическую камеру, измерялось датчиком Холла Vernier MG-BTA. Результаты измерений показаны на рис. 3. Точные измерения тем же датчиком особенностей магнитного поля вблизи стенок камеры затруднены из-за изменений вектора магнитной индукции по направлению.

Поэтому были проведены расчёты индукции магнитного поля.

Расчёт индукции магнитного поля соленоида производился по методу суперпозиции

$$B_i = \sum_{k=1}^N B_{0i}^k(r, z - z_k), \quad (1)$$

где $i = z, r, \varphi$ — нумерация проекции в цилиндрических координатах (z, r, φ); N — число витков соленоида; $B_{0i}^k(r, z)$ — i -й компонент индукции магнитного поля k -го витка; z_k — координата k -го витка. По закону Био—Савара [5] векторный потенциал

Рис. 3. Результаты измерения индукции продольного магнитного поля вдоль оси соленоида. Сила тока в соленоиде $I = 50$ А

$$A_i = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl_i}{r}, \quad (2)$$

где I — ток соленоида, интеграл берётся по витку с элементом длины dl_i . В цилиндрических координатах с учётом осевой симметрии

$$B_{0z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi); \quad B_{0r} = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z}; \quad B_{0\phi} = 0. \quad (3)$$

Интегрирование (2) даёт, очевидно, только ϕ -компонент A_i , отличный от нуля:

$$A_\phi = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{R}{r}} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) F\left(k, \frac{\pi}{2}\right) - E\left(k, \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (4)$$

где $k = k(z, r) = \sqrt{\frac{2Rr}{(R+r)^2 + z^2}}$; $F(k, \varepsilon)$ и $E(k, \varepsilon)$ — эллиптические интегралы Лежандра [6] первого и

второго рода соответственно: $F(k, \varepsilon) = \int_0^\varepsilon \frac{d\xi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi}}$; $E(k, \varepsilon) = \int_0^\varepsilon \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} d\xi$.

Окончательно, используя (3), имеем

$$B_{0z} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2z}{\sqrt{(R+r)^2 + z^2}} \left[F\left(k, \frac{\pi}{2}\right) + \frac{R^2 - r^2 - z^2}{(R-r)^2 + z^2} E\left(k, \frac{\pi}{2}\right) \right]; \quad (5)$$

$$B_{0r} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2z}{\sqrt{(R+r)^2 + z^2}} \left[\frac{R^2 + r^2 + z^2}{(R-r)^2 + z^2} E\left(k, \frac{\pi}{2}\right) - F\left(k, \frac{\pi}{2}\right) \right]. \quad (6)$$

Результаты расчётов для тока $I = 50$ А показаны на рис. 4—6.

Рис. 4. Зависимость z -компонента магнитной индукции соленоида от координаты z (вдоль оси) при различных значениях расстояния r от оси симметрии: $r = \alpha R$, $\alpha = 0, 0,1, 0,2, \dots, 0,8$, $R = 93$ мм — радиус витка обмотки соленоида, $0,8R$ — радиус внутреннего объёма вакуумной камеры. Расчёт выполнен для тока в катушках $I = 50$ А

Как видно на рис. 4, продольное поле на оси соленоида имеет заметный провал в месте сочленения секций вакуумной камеры, неоднородность намотки в зоне диагностического окна практически не влияет на однородность поля. Радиальный компонент индукции (см. рис. 4), отсутствующий на оси симметрии, значительно возрастает с удалением от этой оси и весьма чувствителен к степени однородности намотки. Мо-

дуль магнитной индукции $\sqrt{B_r^2(r, z) + B_z^2(r, z)}$ показан на рис. 6. Отметим, что вблизи стенок камеры, где радиальный компонент максимален,

Рис. 5. Зависимость r -компонента магнитной индукции соленоида от координаты z при различных значениях расстояния r от оси симметрии: $r = \alpha R$, $\alpha = 0, 0,1, 0,2, \dots, 0,8$, $R = 93$ мм — радиус витка обмотки соленоида, $0,8R$ — радиус внутреннего объёма вакуумной камеры. Расчёт выполнен для тока в катушках $I = 50$ А

Рис. 6. Зависимость модуля вектора магнитной индукции соленоида от координаты z при различных значениях расстояния r от оси симметрии: $r = \alpha R$, $\alpha = 0, 0,1, 0,2, \dots, 0,8$, $R = 93$ мм — радиус витка обмотки соленоида, $0,8R$ — радиус внутреннего объёма вакуумной камеры. Расчёт выполнен для тока в катушках $I = 50$ А

магнитная индукция определяется, в основном, азимутальным компонентом полей постоянных магнитов восьмиполусной системы, которая имеет величину от 0,1 до 0,2 Тл.

Рис. 7. Схема восьмиполусной системы постоянных магнитов из неодима, смонтированных на разрядной камере (показано поперечное сечение), противоположные полюса обозначены синим и красным цветом

Восьмиполусная система, окружающая соленоид, показана на рис. 1 и 7. Она состоит из 54 постоянных магнитов марки N45H размером $45 \times 15 \times 15$ мм каждый. Магнитный момент каждого из магнитов составляет величину около $2,6 \cdot 10^4$ А·м². Между отдельными магнитами, закреплёнными вдоль одной линии внутри кассеты из немагнитной стали, параллельной оси z, имеются зазоры 10—20 мм. Данная ширина зазора представляет собой компромисс между требованием достичь большей однородности поля вдоль z и требованием снизить размагничивающий фактор [5] системы. Результирующая магнитная индукция такой восьмиполусной системы имеет все три пространственных компонента и сложным образом зависит от r , z и ϕ . Требуется в дальнейшем провести подробные измерения и расчёты

магнитной индукции восьмиполусной системы. Проведённые первичные измерения показали, что вблизи стенок вакуумной камеры она достигает в максимуме величины 0,2 Тл.

Плазменный разряд. Плазма в установке создаётся путём ионизации плазмообразующего газа электронным ударом при подаче отрицательного потенциала -200 В на разогретый до температуры 1700 К катод из гексаборида лантана. Сила тока до 30 А при напряжении разряда до 200 В между катодом и заземлённым медным анодом поддерживается внешним стабилизированным источником питания. Электропитание нагревателя катода обеспечивается стабилизированным управляемым источником мощностью 2 кВт, который допускает наличие потенциала 200 В на выходе. Для исключения возникновения разряда между катодом и металлической трубкой, по которой плазмообразующий газ поступает в катодный узел, трубка изолирована от стенок камеры и находится под плавающим потенциалом плазмы. Ввод силового электропитания к катодному узлу осуществляется с помощью четырёх вакуумных вводов с керамическими изоляторами, расположенными на торцевом фланце первой секции разрядной камеры.

Плазменные диагностики. Для регистрации параметров плазмы и контроля устойчивости разряда будут разработаны и изготовлены контрольные и диагностические системы:

- диагностика зондовая;
- диагностика болометрическая;
- диагностика спектроскопическая;
- диагностика тепловых плазменных потоков на облучаемые тестовые образцы;
- диагностика температуры поверхности.

Диагностика зондовая будет использоваться для измерения параметров плазмы в разряде: плотности плазмы, потенциала плазмы, электрических полей, электронной температуры плазмы. Будут регистрироваться средние и флуктуирующие параметры плазмы в диапазоне частот от $0,1$ кГц до 1 МГц. Будет изготовлен многоэлектродный ленгмюровский зонд, монтируемый на подвижный манипулятор для быстрого погружения в плазму («прыгающий» зонд). Число одновременно измеряемых характеристик восемь. Сигналы с электродов зондовой диагностики с помощью изолирующих усилителей сигналов будут регистрироваться АСНИ.

Диагностика болометрическая будет использоваться для оценки интегральных потерь энергии из плазмы за счёт излучения в различных диапазонах. Для определения полной мощности излучения спектральная чувствительность болометра должна быть постоянной во всём спектральном диапазоне измеряемого излучения. Таким требованиям в полной мере отвечают болометры на основе термомпары. Эти болометры позволяют также учесть долю энергии излучения в области вакуумного

ультрафиолета (за счёт надтепловой фракции электронов с энергией до ~ 30 эВ), недоступную для измерения другими детекторами излучения. Однако из-за низкой чувствительности термопарных болометров следует дополнительно использовать другие типы детекторов. Для измерения энергетических потерь в оптическом, ближнем ИК- и мягком УФ-диапазоне будут использоваться детекторы излучения на основе кремниевых фотодиодов. На этот спектральный диапазон приходится основная часть излучения тепловой фракции электронов. Планируется проведение измерений в различных спектральных диапазонах с помощью светофильтров для оценки температуры и плотности плазмы по соотношению интенсивностей измеряемых сигналов.

Для диагностики спектроскопической будет использован спектрометр AvaSpec-ULS2048x16-USB2-RM, работающий в первом порядке дифракции в диапазоне длин волн $\lambda = 200\text{—}1100$ нм. Спектрометр имеет три независимых канала измерения. Реализована возможность автоматического учёта кривых чувствительности CCD-матриц для получения спектра в абсолютных единицах. Диапазоны каналов спектрометра частично перекрываются, что позволяет контролировать настройку каналов по абсолютной интенсивности излучения.

Характеристики измерительных каналов спектрометра AvaSpec-ULS2048: канал УФ-диапазона — дифракционная решётка 1200 штрихов/мм, диапазон длин волн 204—462 нм, разрешение не хуже 0,18 нм; канал видимого диапазона — дифракционная решётка 1800 штрихов/мм, диапазон длин волн 460—589 нм, разрешение не хуже 0,12 нм; канал ИК-диапазона — дифракционная решётка 600 штрихов/мм, диапазон длин волн 588—1088 нм, разрешение не хуже 0,3 нм. Для регистрации излучения в каждом канале применён CCD-детектор размером 75 мм, состоящий из 2048 пикселей.

На основе анализа абсолютных интенсивностей спектральных линий излучения плазмы, формы профилей отдельных спектральных линий, интенсивности континуума будут измерены концентрация электронного и ионного компонентов плазмы и оценены их функции распределения по скоростям.

Диагностика тепловых плазменных потоков на облучаемые тестовые образцы и температуры поверхности тестовых материальных образцов (вольфрама, молибдена и др.), облучаемых плазмой, будет обеспечена с помощью термопар и локальными зондовыми измерениями плазменного потока на облучаемый образец. Температура поверхности испытываемых материальных образцов будет измеряться с помощью термопар и на основе анализа теплового облучения образцов (оптическая пирометрия). Диапазон измеряемых температур от 20 до 2000 °C.

Установка будет оснащена автоматизированной системой сбора информации и управления, построенной по модульному принципу. Будут использованы модули стандарта PXI, а также отдельные приборы, интегрированные в систему посредством цифрового управления по шинам RS-485, GPIB и USB. Управление системой будет осуществляться специально разработанным программным комплексом.

Система сбора информации и управления будет выполнять следующие задачи:

- управление средствами откачки и основными источниками питания для поддержания плазменного разряда;

- контроль давления в вакуумной камере, температуры стенки вакуумной камеры и внутрикамерных элементов, силы тока источника питания плазменного разряда, напряжения в разрядном промежутке;

- сбор информации со всех используемых плазменных диагностик;

- защита оборудования в аварийных режимах работы.

Сигналы датчиков установки регистрируются аналого-цифровыми преобразователями, информация в виде цифровых данных помещается в компьютерную базу данных.

Узел плазменных испытаний мишени. Материальные образцы (вольфрамовые, молибденовые и др.) с плоской геометрией поверхности размером до 2×2 см, на которых будет создаваться высокоразвитая поверхность, крепятся на манипулятор для перемещения в плазменный разряд во второй секции камеры. Образцы будут прогреваться до 1000 °C нагревательным токовым элементом, температура нагрева образцов будет контролироваться термопарами. Для экспериментов, планируемых в перспективе, предусмотрено водяное охлаждение подложки тестовых образцов.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РАБОТЫ

Разработка методики получения структуры поверхности с большой удельной площадью на тугоплавких металлах. Планируется провести цикл работ, направленных на создание технологии получения уникальной структуры поверхности тугоплавких металлов с размером элементов структуры до 50 нм, что в настоящее время недостижимо при промышленном производстве спецдеталей из тугоплавких металлов — вольфрама, молибдена, титана.

Рис. 8. Структура типа «пух» на поверхности вольфрама при дозе $\text{He}^+ 5,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$ [8]

Образование «пуха» на поверхности металлов. Первой планируемой задачей является разработка технологии получения структуры типа «пух» (от англ. fuzz) на поверхности вольфрама и других металлов (рис. 8) [7].

Такая структура пуха имеет ряд положительных качеств, таких как пониженный коэффициент распыления и большое тепловое излучение, практически как у абсолютно чёрного тела, снижающее температуру поверхности при тепловых нагрузках и повышающее стойкость поверхности к тепловым нагрузкам [8]. Поверхность со структурой пуха обладает большой удельной площадью, что имеет большое значение для адсорбции газов и катализа. Такая поверхность интересна также

как эффективный автоэлектронный катод. На такой поверхности лучше развиваются дуги [9], а продуктами эрозии могут быть волоски пуха. Такая наноразмерная пыль, образованная в термоядерном реакторе, рассматривается как негативный фактор, вызывающий радиационное охлаждение плазмы.

В настоящее время об образовании пуха на поверхности вольфрама известно следующее:

- для образования пуха необходимо облучение в плазме ионами He^+ с энергией более 20—30 эВ при температуре вольфрама в интервале 1000—2000 К [8];

- толщина слоя пуха растёт со временем пропорционально $t^{1/2}$ и при плотности ионного тока 10^{18} — $10^{19} \text{ He}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, за время $t \sim 10^4 \text{ с}$ образуется слой пуха $\sim 5 \text{ мкм}$ [10]. В предположении диффузионного роста толщины слоя пуха $h = (2D_{\text{эф}}t)^{1/2}$ эффективный коэффициент диффузии равен $D_{\text{эф}} = D_0 \exp(-E_{\text{эф}}/T)$, где энергия активации $E_{\text{эф}} = 0,7 \text{ эВ}$, предэкспоненциальный множитель $D_0 \sim 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ [10].

Поскольку структура типа «пух» образуется при высокой температуре, то на установке предусмотрен подогрев мишени.

Относительно механизма образования пуха существуют две модели, описанные в работах [11, 12]. В работе [11] появление наноразмерных волосков объясняется как рост «вязких пальцев», возникающий в результате градиента напряжения, обусловленного давлением в гелиевых пузырьках, находящихся в волосках. К такому подходу имеются критические вопросы: почему такие «пальцы» не разрываются в результате вскрытия пузырьков? Ведь разрыв пузырьков и образование дырок наблюдаются [8] раньше, чем начинается рост волосков. Образование блистеров происходит при облучении ионами He^+ килоэлектронвольтовых энергий [13] в интервале температуры 0,2—0,4 T_m , где T_m — температура плавления. Для вольфрама именно в этом диапазоне температуры происходит образование пуха в результате возникновения полости именно при разрыве материала между близлежащими пузырьками на глубине максимальной концентрации внедрённого гелия.

В работе [12] предлагается другой механизм образования пуха. Эта модель объясняет образование пуха на поверхности вольфрама при его облучении в гелиевой плазме ростом волосков пуха из адатомов, образующихся при бомбардировке ионами гелия. Порог энергии ионов He^+ для образования адатомов приблизительно в 3 раза меньше порога распыления. Кинетика диффузии адатомов по волоскам описывает зависимость толщины слоя пуха от времени в количественном согласии с экспериментом. Кроме образования адатомов роль облучения ионами гелия заключается в образовании «рваной» поверхности, возникающей при разрыве гелиевых пузырьков и, возможно, в скапливании адатомов над

пузырьками вследствие растяжения оболочек пузырьков. Эти факторы способствуют зарождению кластеров, служащих зародышами для волосков, растущих из адатомов и формирующих структуру пуха.

На плазменной установке НИУ «МЭИ» планируются работы по уточнению механизма роста структуры типа «пух». Понимание механизма позволит разработать оптимальную технологию получения такой структуры.

Образование конусов, вискеров и гребней. Другой пример изменения структуры поверхности под действием ионной бомбардировки — это образование на поверхности конусов, вискеров (от англ. усов) и гребней, т.е. появление развитого рельефа (см. пример на рис. 9). Впервые, по-видимому, Гюнтершульц [14] заметил образование матовой поверхности в результате ионной бомбардировки. Первые электронно-микроскопические исследования конусов были выполнены в 1951 г. методом реплик [15, 16], затем с появлением сканирующего электронного микроскопа появилось большое число работ, где были изучены основные закономерности образования конусов, которые можно сформулировать следующим образом:

Рис. 9. Конусы на поверхности грани (001) монокристалла меди с осаждёнными атомами Ti после облучения ионами аргона (40 кэВ, $2 \cdot 10^{21}$ ион/см²) (а); конусы на поверхности монокристалла меди (001) после облучения ионами аргона (40 кэВ, $7 \cdot 10^{21}$ см⁻²), вершины конусов загибаются вследствие нагрева и термического напряжения (б)

— конусы образуются при облучении ионами энергией от ~ 100 эВ до ~ 100 кэВ на поверхности металлов, полупроводников, диэлектриков;

— необходимым условием образования конусов, согласно [17], является присутствие примесей на поверхности;

— отдельные конусы появляются уже при дозе $\sim 10^{16}$ частиц/см², их высота и плотность растут с ростом дозы. В ряде случаев при дозе $\sim 10^{22}$ частиц/см² поверхность сплошь покрыта конусами высотой ~ 10 мкм;

— образование и рост конусов идут быстрее на более открытых гранях монокристалла.

Существуют две точки зрения на механизм образования конусов. Картер с сотрудниками [18] считают, что конусы и вообще развитие рельефа на поверхности есть следствие зависимости коэффициента распыления Y от угла θ падения ионов на мишень. Задав зависимость $Y(\theta)$, они математически показали, что наиболее вероятно формирование рельефа с преимущественными наклонами поверхности, соответствующими минимуму $Y(\theta = 0)$ и максимуму $Y(\theta_m)$, где θ_m — угол падения ионов, при котором наблюдается максимум коэффициента распыления, θ_m зависит от энергии ионов и обычно составляет $\theta_m = 60\text{—}80^\circ$. Угол при вершине конуса действительно близок к $2\theta_m$.

Другая точка зрения [19, 20] отдаёт предпочтение механизму роста конусов за счёт миграции атомов по поверхности к некоторым затравочным центрам, которыми могут служить примеси. Вискеры, по-видимому, тоже не что иное, как кристаллы, образовавшиеся на поверхности за счёт радиационно-стимулированного роста.

В работе [21] на основе теоретического рассмотрения неравновесных подвижных атомов на поверхности, существующих во время ионного облучения, показано, что на ранней стадии развития конусов (до ~ 1 мкм) преобладает механизм роста конусов, а на поздней стадии — механизм распыления. Для

более подробного ознакомления с закономерностями образования рельефа поверхности при ионной бомбардировке рекомендуем обзор [19].

В работе [21] также показано, что во время облучения на поверхности образуется большое (на несколько порядков больше, чем равновесное) число неравновесных слабо связанных атомов. Их концентрация зависит от плотности тока, которая определяет скорость их образования, и от температуры, которая определяет скорость их исчезновения на стоках. Поскольку энергия связи этих атомов меньше, чем энергия сублимации, то можно ожидать, что они распыляются сильнее.

Недавно авторы [22] показали, что при больших дозах облучения конусы быстрее растут на деформированных поверхностях.

Уместно отметить, что поверхность, сплошь покрытая конусами, имеет меньший коэффициент распыления вследствие осаждения продуктов распыления на боковых поверхностях конусов. Причём изменения дефектной структуры мишени и образование конусов в процессе ионного облучения могут скакаться на изменении коэффициента распыления при больших дозах облучения $>10^{21}$ — 10^{22} частиц/см². Многие измерения коэффициентов распыления проводятся при меньших дозах. А этот вопрос имеет как теоретическое, так и большое практическое значение.

С точки зрения аэродинамики интересна поверхность с периодической структурой гребней, которая образуется при распылении поверхности наклонным пучком ионов в определенном интервале температуры, зависящем от вида и энергии иона [23]. Поскольку в большинстве случаев необходимый интервал — это температуры ниже комнатной, то для получения такой структуры необходимо охлаждение мишени. Периодическая структура наиболее исследована на поверхности полупроводников при наклонном падении ионов (обычно при $\theta = 30$ — 60°) (рис. 10).

Рис. 10. Поверхность Ве после облучения ионами Ве⁺ энергией 1 кэВ под углом 60° при температуре мишени 670 К

Интересно отметить, что расстояние между гребнями ~ 1 мкм, что много больше, чем длина пробега иона. Кремний при облучении аморфизуется у поверхности, и ориентация гребней не зависит от ориентации исходного образца. Гребни ориентированы перпендикулярно плоскости падения ионов (см. рис. 10). Интересно, что при скользящем падении ионов ($\theta \sim 80^\circ$) ориентация гребней меняется на параллельную плоскости падения ионов [24]. По-видимому, образование периодического рельефа связано с преимущественным переносом дефектов (и/или внедрённых ионов) в направлении, перпендикулярном гребням.

При $\theta \sim 45^\circ$ ионы кэВ-ных энергий, в основном, внедряются в мишень и передают свой импульс параллельно плоскости падения ионов, при $\theta \sim 80^\circ$ основная доля ионов отражается от поверхности, не передавая своего импульса (составляющей импульса параллельной поверхности) мишени, в то время как преимущественный импульс первичных смещённых атомов перпендикулярен траектории иона.

Ещё ранее Элих, Розендал и Ондерделинден [25] наблюдали подобную периодическую структуру при облучении монокристалла меди (100) ионами неона (10 и 20 кэВ), если пучок отклонялся от направления каналирования, соответствующего минимуму коэффициента распыления, на 6 — 7° . Интересно, что при этом появлялся небольшой максимум (тонкая структура) на кривой зависимости коэффициента распыления от угла падения. Периодическая структура обнаружена также при самораспылении бериллия [26].

Пористые (шероховатые) слои с уникальной поверхностной структурой наблюдаются после облучения в термоядерных устройствах, включая так называемые материалы с фрактальной структурой, которые имеют развитую структуру с иерархией гранулярности (например, типа цветной капусты) [27, 1, 2]. Такие структуры имеют увеличенную удельную площадь по сравнению с гладкой или обычной шероховатой структурой (например, даже треснутой поверхности со значительными разрушениями). Особенностью таких фрактальных структур является наличие различных масштабов структуры поверхности (поры, кратеры и т.д.) от десятков нанометров до десятков микрометров, что может обеспечить, например, особые физико-химические свойства и каталитические свойства такой многомасштабной поверхности.

Наблюдалась автомодельная (фрактальная) поверхностная стохастическая структура с разными масштабами гранулярности в диапазоне от нанометров (рис. 11) [1, 2] на различных материалах, таких как углерод, вольфрам, бериллий, облучённых высокотемпературной плазмой в импульсных установках (КСПУ-Т) и токамаке Т-10. Это может указывать на универсальные механизмы стохастической кластеризации материалов под воздействием высокотемпературной плазмы [2, 27]. Такая кластеризация качественно отличается от тривиальной шероховатости броуновской поверхности.

Рис. 11. СЭМ-микрофотографии образца после теста с высокой тепловой плазмой: *а* — углеродная плёнка из токамака Т-10 [27]; *б* — вольфрам из установки КСПУ-Т [2]; *в* — вольфрам из токамака Т-10 [1]

Капиллярно-пористые электроды для магнитогидродинамических плазменных преобразователей энергии. Недавно было предложено использовать капиллярно-пористые электроды для магнитогидродинамических плазменных преобразователей энергии [28]. Наибольшее воздействие испытывают стенки (называемые огневыми) магнитогидродинамических плазменных преобразователей энергии, состоящие из изолирующей стенки и токосъёмных проводящих электродов. Для стационарных магнитогидродинамических плазменных преобразователей энергии наибольшая проблема — это токосъёмные электроды. Капиллярно-пористые электроды, наполненные жидким металлом, могут быть возобновляемыми за счёт пополнения жидкого металла их резервного объёма. При этом свойства электрода не деградируют. Исследование капиллярно-пористых электродов при воздействии на них больших токов — важная задача, которую можно решать на плазменной установке НИУ «МЭИ».

Тестирование тугоплавких металлов. На установке НИУ «МЭИ» планируется провести экспериментальные исследования и тестирование тугоплавких металлов — вольфрама, молибдена, титана в условиях действия стационарных плазменно-тепловых нагрузок на поверхность тестовых мишеней. Нагрев поверхности мишеней до температуры ~ 1000 К будет обеспечен нагревным элементом подложки, ионный поток гелия на металлический образец более $3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

На первой стадии экспериментальных исследований будут проведены тестовые облучения вольфрамовых образцов различных промышленных марок в гелиевом разряде в течение нескольких десятков минут (до ~ 60 мин и более) с целью получить наноструктурированную высокопористую поверхность со структурой типа «пух» с размером нановолокон до 50 нм. Образцы размером до 2×2 см будут прогреваться нагревателем в диапазоне температуры от 300 до 1000 °С. Будет проведено измерение параметров плазмы в этих экспериментах и проведён анализ результатов измерений с целью определения требуемых режимов плазменной нагрузки на материал. Полученные образцы с изменённой поверхностью будут исследоваться с помощью методов сканирующей электронной и туннельной микроскопии и рентгеновской спектроскопии. Будут получены данные о микро- и наноструктуре поверхности и характеристиках пористости для анализа и последующего выбора оптимальных режимов плазменной обработки вольфрамовых мишеней. Будет проведено измерение теплопроводности высокопористой поверхности образцов методом калориметрии и методами, применяемыми для наноструктурированных материалов. На основе перечисленных работ будет проведён анализ результатов исследований и выработана технологическая карта режимов разряда и параметров плазмы, которые обеспечивают оптимальные условия формирования высокопористой структуры вольфрама в гелиевом плазменном разряде. На следующей стадии экспериментальных исследований перечисленные мероприятия будут повторены для молибденовых тестовых мишеней с целью разработки технологической карты получения наноструктурированного молибдена со структурой поверхности типа «пух» при облучении в гелиевом плазменном разряде.

Дальнейшие экспериментальные исследования будут проведены в плазменных разрядах с рабочим газом дейтерием с целью выявить возможность получения высокопористых вольфрамовых и молибденовых поверхностей под действием дейтериевой плазмы.

Испытание материалов ИТЭР. Вольфрам планируется использовать для изготовления компонентов первой стенки в установках реакторного масштаба: в ИТЭР будет эксплуатироваться вольфрамовый дивертор, рассматриваются вопросы использования вольфрама в термоядерном источнике нейтронов (ТИН) и реакторе ДЕМО. Эксплуатация вольфрамового дивертора ИТЭР требует дополнительных испытаний и изучения стойкости вольфрама в условиях повышенных плазменных нагрузок [1]. Для исследования всех эффектов воздействия на вольфрамовые пластины, ожидаемых в ИТЭР, необходим комплекс испытаний, которые моделируют переменное воздействие всех типов нагрузок: ЭЛМов, срывов и плазменной нагрузки стационарного разряда. На установке НИУ «МЭИ» будет проведено испытание модулей облицовки дивертора ИТЭР стационарными плазменными потоками с длительностью более 100 мин. Планируется комбинированное испытание плазменными (плазменная установка НИУ «МЭИ»), циклическими тепловыми с использованием электронного пучка (электронно-лучевая установка НИУ «МЭИ») и мощными импульсными плазменными нагрузками (КСПУ-Т, ТРИНИТИ), ожидаемыми в срыве и ЭЛМах в ИТЭР. Такие комбинированные испытания обеспечат адекватные условия нагрузок, ожидаемых при эксплуатации материалов дивертора в ИТЭР.

Стоит задача дополнительной защиты поверхности вольфрамовых пластин дивертора в ИТЭР. Рассматриваются предложения защиты такой поверхности с помощью покрытия/напыления на неё композитных материалов, лития, карбида бора и др. Перспективным также представляется использовать в качестве защитной поверхности пористую вольфрамовую структуру. Изменённая микроструктура поверхности вольфрамовых пластин, обращённых к плазме, может изменить условия взаимодействия плазма—стенка. Ожидаются эффекты взаимного влияния вольфрамовой рекристаллизованной шероховатой поверхности и приповерхностной плазмы, включая эффекты повышенной термоэмиссии негладкой поверхности и связанные с этим эффекты изменения передачи тепла из плазмы на поверхность, дуговые процессы, образование пылевых частиц и влияние на процессы переноса тепла и плазмы в периферийной плазме, в том числе на неамбиполярную диффузию. Такие процессы в экспериментах не исследовались. Вместе с тем все эти эффекты могут значительно влиять на стабильность пристеночной плазмы и параметры переноса тепла из плазмы на материальную поверхность в токамаке-реакторе.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С РАЗВИТОЙ И ВЫСОКОПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Материалы с развитой и высокопористой поверхностью нового поколения востребованы для эксплуатации при экстремальных тепловых и плазменно-пучковых нагрузках, в том числе для термоядерных и атомных реакторов, а также для использования в высокотехнологичных отраслях промышленности, в том числе для покрытия обтекаемых поверхностей летательных аппаратов с целью уменьшения аэродинамического сопротивления при сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростях, для синтеза новых нано-структурных материалов с заданными функциональными свойствами и металлоорганических композитных материалов. Тугоплавкие материалы, такие как вольфрам и молибден с развитой и высокопористой поверхностью, востребованы как протекторы при повышенной тепловой и плазменной нагрузке. Нано-структурированные металлы и их оксиды являются важным материалом для применения в качестве активных слоёв в газовых микродатчиках. Вольфрам и его оксиды являются перспективными кандидатами селективного захвата водорода, что важно для систем водородной энергетики и обеспечения безопасности таких систем. Композиционные пористые материалы на основе вольфрама и молибдена считаются очень перспективным эффективным катализатором для получения водорода [29]. Получение высокопористой поверхности титановых компонентов имеет большое значение для технологии изготовления титановых медицинских протезов. Материалы с различными типами пористости пользуются спросом в качестве матрицы для роста сложных металлоорганических соединений [30, 31] в биомедицинских технологиях. В медицинских исследованиях было показано, что фрактальная геометрия (т.е. поверхность с сильно развитой поверхностью) электродов повышает эффективность нейронной стимуляции и применения нейронных протезов [32], а также используется фрактальная геометрия электродов электрических кардиостимуляторов [33], имплантированных в сердце человека для лечения сердечной аритмии. Все эти области применения определяют актуальность и технологическую востребованность исследований и испытаний материалов в плазменной установке НИУ «МЭИ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плазменная установка НИУ «МЭИ» предназначена для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения, в том числе для испытаний материалов в обеспечение отечественной программы создания термоядерного реактора (ТИН и ДЕМО) и международного термоядерного реактора ИТЭР. Установка представляет собой плазменную ловушку с линейной мультикасповой конфигурацией магнитного поля со стационарным плазменным разрядом с параметрами плазмы, обеспечивающими возможность мощной плазменно-тепловой нагрузки, ожидаемой на материалы в стационарных режимах термоядерного реактора. Цель работ — получение детальных систематизированных экспериментальных данных о параметрах действия горячей плазмы на тугоплавкий материал, которые будут использованы для создания физической модели стохастической кластеризации поверхности под воздействием плазменно-пучковых потоков, что открывает возможность для более глубокого понимания факторов, определяющих характеристики конструкционных материалов. Такие исследования являются актуальной задачей для развития подходов к конструированию новых материалов, обладающих новыми физико-химическими свойствами, что представляет значительный интерес для ядерных, химических, энергетических, биомедицинских технологий. Разработка, создание и массовое промышленное производство таких материалов нового поколения будут, с одной стороны, способствовать развитию современных технологий, с другой стороны, повышение конструкционных характеристик тугоплавких материалов позволит расширить диапазон их применения в инновационных отраслях науки и техники.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-19-01469.

Авторы благодарят профессора С. Такамуру за полезные обсуждения и помощь, д.ф.-м.н. Б.И. Хрипунова — за полезные советы.

REFERENCES

1. **Budaev V.P.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 4, p. 5 (in Russian).
2. **Budaev V.P.** — Pis'ma v ZhETF (Letters to JETPh), 2017, vol. 105, p. 5 (in Russian).
3. **Takamura S.** — J. of Nuclear Materials, 2015, vol. 463, pp. 325—328.
4. **Martynenko Yu.V., Sobolev R.I.** Magnetic field of mirror configuration, increasing by the radius. — Atomnaya energiya (Atomic energy), 1964, vol. 17, № 3, p. 211 (in Russian).
5. **Landau L.D., Lifshits E.M.** Theoretical physics. Vol. VIII. Electrodynamics of continuous media. — M.: Nauka (Science), 1982. 620 p.
6. **Korn G., Korn T.** Reference on mathematics. — M.: Nauka (Science), 1973. 831 p. (in Russian).
7. **Takamura S., Ohno N., Nishijima D. et al.** — Plasma Fusion Res., 2006, vol. 1, p. 51.
8. **Kajita S., Sakaguchi W., Ohno N., Yoshida N., Saeki T.** — Nucl. Fusion, 2009, vol. 48, p. 095005.
9. **Doerner R.P., Baldwin M.J., Stangeby P.** — In: 14th Meeting ITPA DivSOL Group. Seoul. 10, 8—21 2010.
10. **Baldwin M., Doerne R.** — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, p. 035001.
11. **Krashenninnikov S.I.** — Phys. Scr., 2011, vol. 145, p. 014040.
12. **Martynenko Yu.V., Nagel' M.Yu.** Model of «fuzz» formation on the tungsten surface. — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2012, vol. 38, № 12, pp. 1082—1086 (in Russian).
13. **Guseva M.I., Martynenko Yu.V.** — UFN (APhS), 1981, vol. 135, № 4, pp. 671—691 (in Russian).
14. **Gunterschulze A., Thompson W.V.** — Z. Phys., 1942, vol. 119, p. 685.
15. **Spivak G.V., Prilezhaeva I.N., Gruz E.A.** — Proceedings of the Academy of Sciences. Ser. Physics, 1951, vol. 15, p. 409 (in Russian).
16. **Shemaev A.M., Sil'vestrovich I.N., Frimer A.I.** — Proceedings of the Academy of Sciences. Ser. Physics, 1951, vol. 15, p. 413 (in Russian).
17. **Gvosdover R.S., Efremenkova V.M., Shelyakin L.B., Yurasova V.E.** — Rad. Eff., 1976, vol. 26, p. 237.
18. **Carter G., Colligon J., Nobes M.** — J. Mat. Sci., 1971, vol. 4, p. 730; vol. 6, p. 115.
19. **Begrambekov L.B.** — Itogi nauki i tekhniki. Ser. Puchki zaryazhennykh chastits i tverdoe telo (Results of science and technology. Ser. Beams of charged particles and solid), 1993, vol. 7, p. 4 (in Russian).
20. **Wehner G.K.** Status Report, Ion Beam Sputter Etch and Deposition Study. Prepared for NASA, Lewis Research Center Cleveland, Ohio 44135, 1979.

21. **Drozdova N.V., Martynenko Yu.V.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1980, issue 1(5), p. 111 (in Russian).
22. **Bobrova M.K., Vereshagina O.A., Shelyakin L.B.** — In coll.: Materials of 12-th International conference «Ions interaction with the surface», 1995, vol. 1, p. 64 (in Russian).
23. **Carter G., Vishnyakov V., Martynenko Y.V. et al.** — J. Appl. Phys., 1995, vol. 78, p. 3559.
24. **Carter G., Vishnyakov V., Nobes M.** — In: 16th International Conference on Atomic Collision in Solids. Lintz. Austria, 1995, p. O10.
25. **Elich J.J., Rjsendal H.E., Onderdelinden D.** — Rad. Eff., 1971, vol. 8, p. 1.
26. **Guseva M.I., Korshunov S.N., Gureev V.M., Martynenko Yu.V., Neumoin V.E., Stolyarova V.G.** — J. Nucl. Mater., 1997, vol. 241—243, pp. 1117—1121.
27. **Budaev V.P., Khimchenko L.N.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2008, issue 3, p. 34 (in Russian).
28. **Martynenko Yu.V., Il'gisonis V.I.** Capillary-porous electrodes for MHD plasma energy converters. Inquiry application for invention № 2017108625 of 15.03.2017 (in Russian).
29. **Xu-Dong Wang et al.** — Energy Environ. Sci., 2016, vol. 9, pp. 1468—1475.
30. **Barth J.V. et al.** — Nature, 2005, vol. 437, pp. 671—679.
31. **Wu H.B.** — Nature Communications, 2015, vol. 6, p. 6512.
32. **Golestani-rad L. et al.** — Front Neuroeng., 2013, vol. 6, p. 3.
33. **Xu L. et al.** — Advanced Materials, 2015, vol. 27(10).

AUTHORS

Budaev V.P. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russia; budaev@mail.ru

Fedorovich S.D. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia

Lukashevsky M.V. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia

Martynenko Yu.V. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Gubkin M.K. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia

Karpov A.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia

Lazukin A.V. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia; Central Scientific-Research Institute of Machine-Building Technology (CNIITMASH), ul. Sharikopodshipnikovskaya 4, 115088 Moscow, Russia

Shestakov E.A. National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Krasnokazarmennaya 14, 111250 Moscow, Russia; NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 19 June 2017
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, issue 3, pp. 23—36