

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ МАГНЕТРОННОЙ ПУШКИ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ПЛОСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Н. И. Айзацкий, А. Н. Довбня, В. В. Закутин¹, Н. Г. Решетняк

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

В настоящей работе описан ускоритель прямого действия для электронно-лучевых технологий, в котором в качестве источника частиц используется магнетронная пушка с вторично-эмиссионным катодом (диаметры катода и анода пушки составляют 40 и 78 мм соответственно). Проведено исследование параметров электронного пучка в диапазоне энергий электронов 60–150 кэВ при длительности импульса 10–20 мкс и частоте повторения импульсов 2 Гц. Описаны схемы по облучению плоских, наружных и внутренних цилиндрических поверхностей.

Приведены результаты по облучению плоской поверхности циркония и сплава Zr 1 % Nb электронным пучком: энергия электронов — 70–80 кэВ, плотность энергии на образцах, вырезанных из труб-оболочек твэлов, — 10–20 Дж/см². Проведены экспериментальные исследования по транспортировке пучка в спадающем и нарастающем магнитном поле соленоида для изучения возможности облучения цилиндрических поверхностей.

The paper describes the direct-action accelerator devised for electron-beam technologies, where the magnetron gun with a secondary-emission cathode serves as a particle source (the cathode and the anode of the gun are 40 and 78 mm in diameter, respectively). Electron beam parameters were investigated in the electron range 60–150 keV at a pulse length of 10–20 μ s and a pulse-repetition frequency of 2 Hz. Circuits for irradiating flat, outside and inner cylindrical surfaces are described.

Data are presented for irradiation of flat Zr and Zr 1 % Nb alloy surfaces with the electron beam having the electron energy 70–80 keV, the energy density on the samples cut out of fuel cladding pipes being 10–20 J/cm². Experiments have been made to investigate the beam transport in the decreasing and rising magnetic field of the solenoid for clarifying the possibility of irradiating cylindrical surfaces.

PACS: 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Для модификации поверхности материалов широко используются электронные ускорители [1, 2]. В настоящей работе описан ускоритель прямого действия для электронно-лучевых технологий, в котором в качестве источника частиц используется магнетронная

¹E-mail: zakutin@kipt.kharkov.ua

пушка с вторично-эмиссионным катодом. Проведено исследование параметров электронного пучка в диапазоне энергий электронов от 60 до 150 кэВ.

Представлены результаты по облучению плоской поверхности циркония и сплава Zr 1 % Nb электронным пучком: энергия электронов — 70–80 кэВ, плотность энергии на образцах, вырезанных из труб-оболочек твэлов, — 10–20 Дж/см². Изучена структура поверхности циркониевых материалов после облучения металлографическими методами, измерения микротвердости в поверхностях и механические свойства с помощью метода наноиндентирования.

Проведены предварительные эксперименты по транспортировке пучка в спадающем и нарастающем магнитном поле соленоида для изучения возможности облучения цилиндрических поверхностей.

ОПИСАНИЕ УСКОРИТЕЛЯ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для облучения использовался электронный пучок ускорителя на основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом [3–5]. Блок-схема ускорителя приведена на рис. 1. Ускоритель состоит из следующих основных узлов: питающего высоковольтного импульсного генератора 1; магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом 2 и анодом 3, размещенной в вакуумной камере; соленоида 5, создающего продольное магнитное поле; мишенного устройства с цилиндром Фарадея 4. Импульс питающего напряжения от импульсного генератора 1 подавался на катод магнетронной пушки.

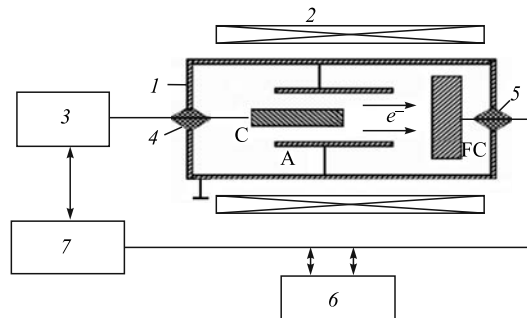


Рис. 1. Схема ускорителя: 1 — импульсный генератор; 2 — катод; 3 — анод; 4 — цилиндр Фарадея; 5 — соленоид; 6 — источник питания соленоида; 7 — электронный пучок

Импульсный генератор 1 обеспечивал формирование импульса напряжения с амплитудой выброса до 190 кВ, длительностью спада выброса $\sim 0,6$ мкс для развития процессов вторично-эмиссионного размножения и амплитудой плоской части импульса напряжения до 150 кВ и длительностью ~ 15 мкс, частота следования импульсов — 2 Гц [6].

Источник электронов (2 — катод, 3 — анод) размещается в вакуумной камере, давление в которой составляло $\sim 10^{-6}$ Торр. Для получения электронного пучка используется магнетронная пушка с диаметром катода — 40 мм, внутренним диаметром анода — 78 мм, длиной катода — 85 мм, анода — 140 мм; материал катода — медь, анода — нержавеющая сталь. Принцип работы пушки основан на обратной бомбар-

дировке вторично-эмиссионного катода электронами, возвращаемыми магнитным полем, образовании электронного облака вблизи катода и формировании пучка [7].

Магнитное поле для формирования и транспортировки электронного пучка создается соленоидом 5, состоящим из четырех секций, питание которых осуществлялось от источников постоянного тока 6. Амплитуду и продольное распределение магнитного поля можно было регулировать путем изменения величины тока в секциях соленоида.

Обработка результатов измерений параметров импульса напряжения, тока пучка на цилиндре Фарадея и их стабильности проводилась с помощью компьютерной измерительной системы. Погрешность измерений составляет 1–2%. Полученные данные выводились на экран компьютера.

Изменение амплитуды и распределения магнитного поля в пушке приводит к изменению тока пучка ускорителя. При проведении облучения с помощью этого эффекта ток пучка значительно изменялся, что показано в таблице, где приведены параметры пучка при облучении мишеней. Максимальные параметры пучка были получены в однородном магнитном поле, при напряжении на катоде ~ 120 кВ магнетронная пушка формирует на выходе пушки электронный пучок с током 125 А и плотностью мощности на мишени ~ 4 МВт/см² при длительности импульса ~ 10 мкс.

Типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде и тока пучка показаны на рис. 2.

Ширина зоны генерации электронного пучка по магнитному полю составляет $\Delta H \sim 200$ Э, что весьма важно при настройке ускорителя при его использовании в технологиче-

Энергия электронов, кэВ	Ток пучка, А	Плотность мощности на мишени, Дж/см ²	Вид магнитного поля
60	68	—	Спадающее
80	85	20	Нарастающее
100	110	—	Однородное
120	125	~ 22	Однородное
140	45	~ 10	Нарастающее

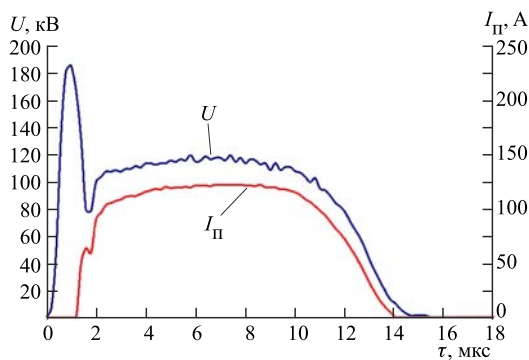


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на катоде (U) и тока пучка ($I_{\text{п}}$)

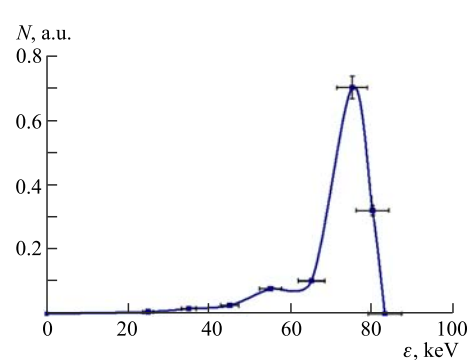


Рис. 3. Типичный энергетический спектр пучка

ских целях. Путем обработки осциллограмм тока и напряжения получен энергетический спектр пучка (рис. 3), из которого видно, что $\sim 80\%$ электронов пучка находятся в диапазоне $\pm 7\%$ с максимумом в точке $0,93 eU$ (U — напряжение на катоде).

Полученные параметры пучка на ускорителе близки к параметрам установок-аналогов, которые в настоящее время используются для экспериментов по облучению [1, 2].

Морфология поверхности облученных образцов и глубина кратеров, образованных под действием электронного пучка, изучалась с помощью оптического микроскопа ММР-4. Измерение микротвердости поверхности образцов проведено прибором ПМТ-3 при нагрузке 50 г. При измерении микротвердости на каждом образце делалось по две дорожки. Для изучения механических характеристик поверхности использовался метод наноиндентирования с помощью прибора Nano Indenter G200, с применением алмазной трехгранной пирамидки Берковича с радиусом затупления при вершине около 20 нм.

ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Использование в ускорителе в качестве источника электронов магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом, в которой формирование пучка происходит в скрещенных электрическом и магнитном полях, имеет существенные особенности. Эти особенности связаны с формированием пучка в магнитном поле, что требует наличия магнитного поля для его транспортировки. При этом облучение плоских образцов осуществляется практически в однородном магнитном поле под прямым пучком (рис. 4, *a*). С другой стороны, уменьшение величины магнитного поля в области нахождения образцов приводит к увеличению диаметра пучка и возможности облучения внутренней цилиндрической

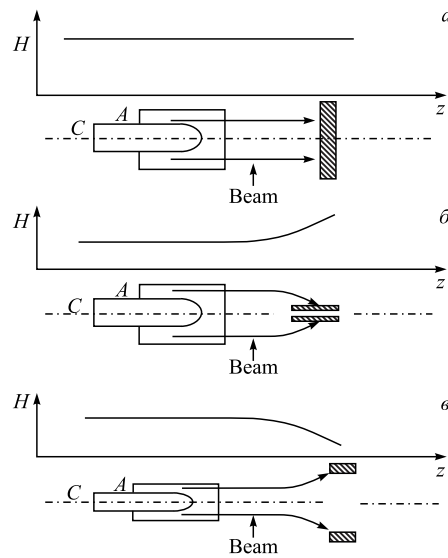


Рис. 4. Схема облучения образцов: *a*) облучение плоской поверхности в однородном магнитном поле; *б*) облучение наружной цилиндрической поверхности в нарастающем магнитном поле; *в*) облучение внутренней цилиндрической поверхности в спадающем магнитном поле

поверхности образцов (рис. 4, *в*). Увеличение магнитного поля вблизи образцов приводит к уменьшению диаметра пучка и возможности облучения наружной цилиндрической поверхности образцов (рис. 4, *б*).

Проведено экспериментальное исследование этих методов облучения пучком ускорителя на основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом.

1. Облучение плоских образцов. Облучаемые образцы закреплялись с помощью мишенного устройства (рис. 5), расположенного на торцевой части цилиндра Фарадея 4, охлаждались водой и находились на расстоянии ~ 90 мм от пушки. Мишенное устройство содержит медный экран 1, закрывающий мишени во время тренировки, и служит для настройки ускорителя на заданные параметры электронного пучка. После настройки ускорителя экран 1 убирается при помощи магнитного поля постоянного магнита. На рис. 5 показано расположение мишеней при облучении. Мишени закреплялись с помощью маски 2. В процессе облучения проводятся измерения напряжения на катоде и тока электронного пучка на мишенях. Поперечные размеры пучка и распределение тока пучка по радиусу определялись при помощи отпечатков на мишенях.

Облучение мишеней (рис. 5) проводилось [8] при напряжении на катоде ~ 80 кВ и токе пучка 85 А (плотность энергии пучка $W = 20$ Дж/см²) в первом случае и ~ 70 кВ и ~ 55 А (плотность энергии пучка $W = 10$ Дж/см²) во втором случае, количество импульсов на мишень — пять.

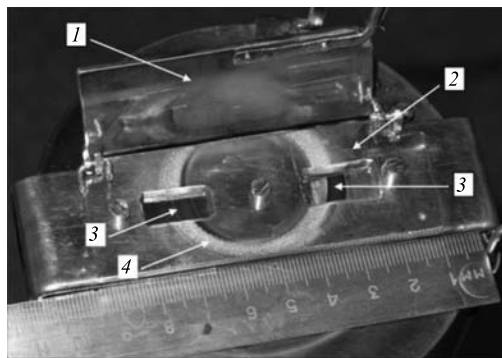


Рис. 5. Мишенное устройство: 1 — защитная шторка; 2 — маска; 3 — отпечатки пучка на образцах; 4 — отпечатки пучка на цилиндре Фарадея

При воздействии на материал мощного импульса пучка электронов слой поверхности толщиной порядка пробега частиц в материале (10–100 мкм) быстро нагревается до температуры фазовых переходов, например до температуры плавления. По окончании импульса воздействия нагретый слой материала быстро охлаждается отводом тепла в толщу материала посредством теплопроводности. В результате этих процессов свойства поверхностного слоя существенно изменяются.

Из рис. 6 видно, что облучение образцов сплава Zr 1% Nb электронным пучком с плотностью энергии $W = 10$ Дж/см² не приводит к равномерному нагреву слоя поверхности материала до температуры плавления (рис. 6, *а, б*). На снимках видны расплавленные участки с расположенными в них твердыми частицами размерами 10–50 мкм, очевидно, это частицы ниобиевой β -фазы, имеющей более высокую температуру плавления.

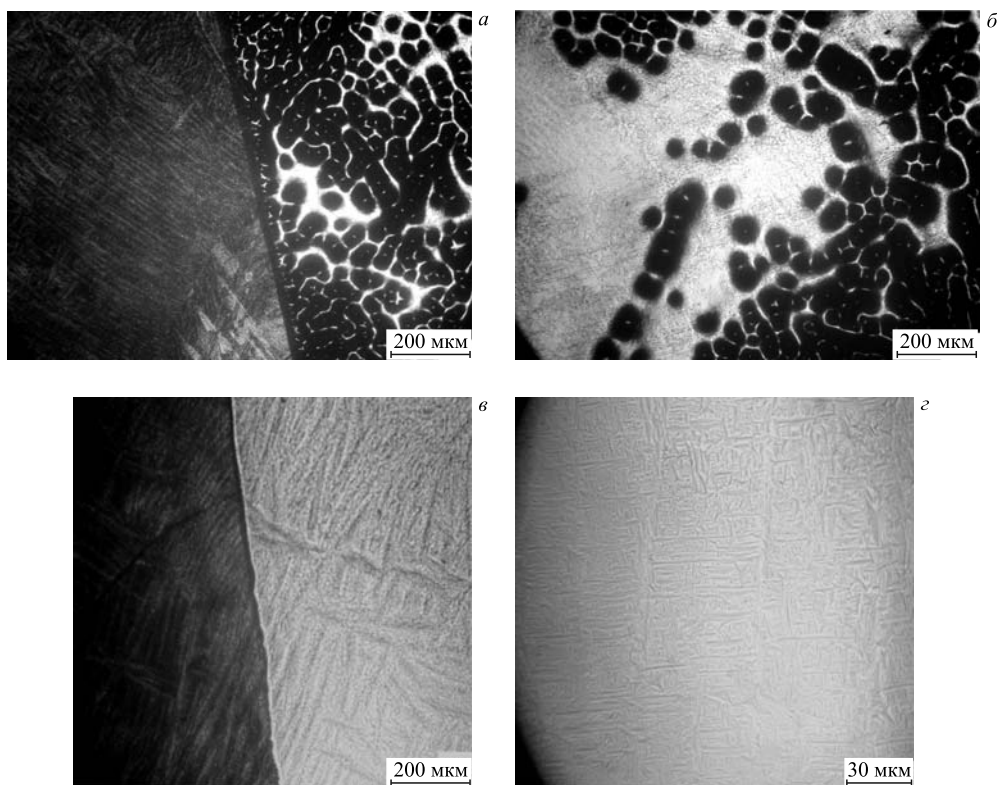


Рис. 6. Фотографии поверхности облученных образцов. Справа внизу показаны метки: а, б, в) 200 мкм, г) 30 мкм

Увеличение плотности энергии пучка до $W = 20 \text{ Дж/см}^2$ приводит к быстрому нагреву поверхности образца до температуры плавления, и по окончании импульса воздействия нагретый слой материала быстро охлаждается. В результате этого структура и свойства поверхностного слоя изменяются. Модифицированная поверхность и граница раздела облученной и необлученной части образца представлены на рис. 6, в, г. Поверхность отличается от исходной: видны более чистые и широкие границы зерен, размер зерен практически не изменился.

Процесс воздействия пучка электронов охватывает широкий круг структурно-фазовых изменений, которые совершаются при нагреве циркониевого сплава и приводят к уменьшению свободной энергии системы.

Измерения нанотвердости поверхности сплава Zr 1 % Nb после облучения электронным пучком показали, что на поверхности формируется нанослой с повышенной твердостью. Максимальная нанотвердость образцов после облучения достигает 3,6 ГПа в сравнении с 2,3 ГПа для исходного образца, причем значение нанотвердости монотонно уменьшается до 3,0 ГПа на глубине 500 нм.

2. Облучение внутренней и наружной цилиндрической поверхности образцов. Проведены эксперименты по измерению размеров пучка при его транспортировке в спадаю-

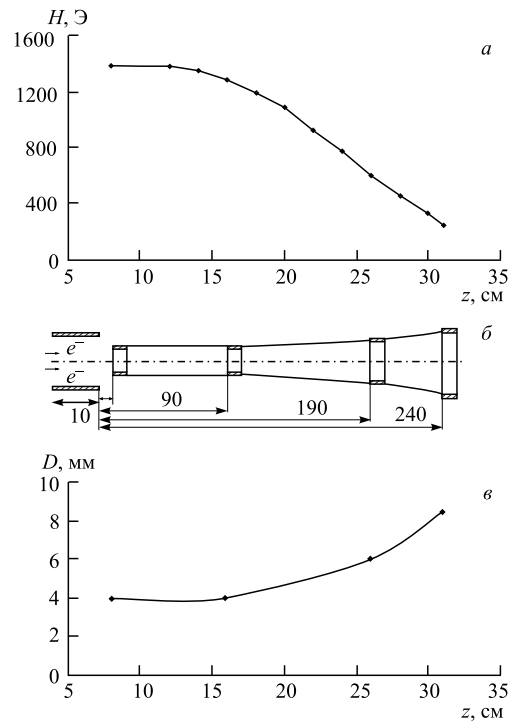


Рис. 7. Экспериментальные результаты измерения наружного диаметра пучка при его транспортировке в спадающем магнитном поле. а) Распределение магнитного поля; б) схема измерений; в) зависимость диаметра пучка D от длины транспортировки z

щем магнитном поле в диапазоне энергий электронов 70–80 кэВ. На рис. 7 приведено распределение магнитного поля вдоль канала транспортировки и наружный диаметр электронного пучка на различных расстояниях от анода пушки.

Как видно из рис. 7, за срезом анода магнетронная пушка формирует трубчатый электронный пучок с наружным диаметром ~ 40 мм с толщиной стенки ~ 2 мм. При транспортировке пучка в однородном магнитном поле (~ 1400 Э) на расстояние ~ 100 мм его диаметр практически не изменяется. Далее, при транспортировке пучка в спадающем магнитном поле, до $H \sim 600$ Э, наружный диаметр пучка увеличивался до ~ 6 см при толщине стенки ~ 4 мм. На расстоянии ~ 240 мм от среза анода магнетронной пушки и в магнитном поле ~ 300 Э наружный диаметр пучка составлял $\sim 8,5$ см при толщине стенки ~ 5 –6 мм.

Полученные результаты показывают, что при размещении образцов с внутренней цилиндрической поверхностью в области спада магнитного поля будет происходить их облучение электронным пучком и плотность тока на образце можно регулировать изменением крутизны спада магнитного поля.

Проведены эксперименты по измерению наружного и внутреннего диаметров пучка при его транспортировке в нарастающем магнитном поле (H), энергия пучка ~ 60 кэВ, ток пучка ~ 50 А (рис. 8). Как видно из рисунка, диаметр пучка уменьшается, при этом уменьшается также и толщина пучка.

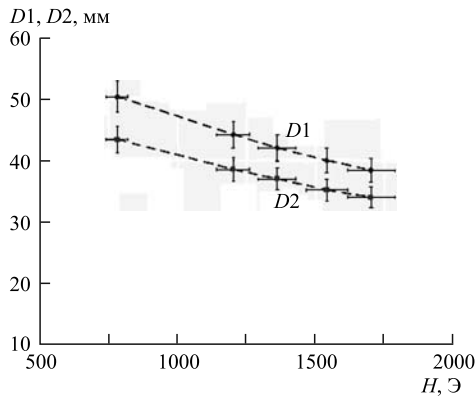


Рис. 8. Зависимость наружного ($D1$) и внутреннего ($D2$) диаметров пучка от амплитуды магнитного поля (H) на расстоянии 5 см от анода

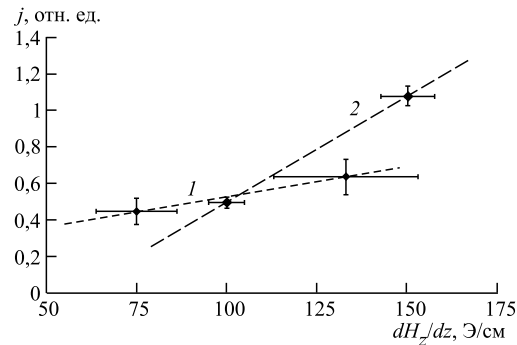


Рис. 9. Зависимость плотности тока пучка (в относительных единицах) на внутренней (1) и цилиндрической (2) поверхностях образцов от крутизны спада магнитного поля

По результатам экспериментов проведены расчеты плотности тока пучка на внутренней и наружной цилиндрической поверхностях образцов в зависимости от крутизны спада магнитного поля (рис. 9). Из рисунка видно, что увеличение крутизны спада магнитного поля повышает плотность тока пучка на образце.

ВЫВОДЫ

Ускоритель с параметрами электронного пучка: энергией электронов ~ 80 кэВ, плотностью энергии на мишени 10–20 Дж/см², длительностью импульса 15 мкс, частотой следования импульсов 2 Гц — может быть рекомендован для целенаправленной модификации поверхности металлов. Для модификации внутренней поверхности трубчатых изделий необходимо провести исследование различных режимов облучения и выбрать оптимальные характеристики электронного облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Engelko V. et al.* Pulsed Electron Beam Facilities (GESA) for Surface Treatment // Proc. of X Intern. Conf. on Applied Charged Particle Accelerators in Medicine and Industry, Saint-Petersburg, Russia, 2001. P. 412–417.
2. *Школьников Э. Я. и др.* Сильноточный ускоритель электронов микросекундной длительности для радиационно-технологических целей // Тр. XI Междунар. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, Россия, 2005. С. 126.
3. *Довбня А. Н. и др.* Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторично-эмиссионным источником // Вестн. Харьковск. ун-та. 2006. № 732, вып. 2(30). С. 96–100.

4. Довбня А. Н. и др. Изучение поверхностей сталей ХВГ, Х18Н10Т и титана ВТ-1 после облучения электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом // *Вопр. атомной науки и техники*. 2009. № 6. С. 134–140.
5. *Reshetnyak N. G. et al.* The Electron Accelerator Based on the Secondary Emission Source Material — Surface Treatment // *Abstr. XX Rus. Conf. on Charged Particle Accelerators*, Novosibirsk, Russia, 2006. P. 108.
6. *Dovbnya A. N. et al.* A Pulsed Modulator to Energize the Secondary-Emission Electron Source of the Technological Accelerator // *Ibid.* P. 106.
7. *Волколупов Ю. Я. и др.* Генерация электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторично-эмиссионным катодом // *ЖТФ*. 2001. Т. 71, вып. 7. С. 88–91.
8. *Довбня А. Н. и др.* Модификация поверхности циркония и сплава Zr 1% Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки // *Вопр. атомной науки и техн.* 2011. № 2(72), вып. 97. С. 39–45.