

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.66

ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПр

© 2023 г. П. А. Федин^{a, *}, К. Е. Прянишников^{a, b}, А. В. Зиятдинова^a, А. В. Козлов^a,
Р. П. Куйбида^a, Т. В. Кулевой^{a, b}, Н. П. Бобырь^a, Д. А. Абин^b,
И. А. Руднев^b, А. А. Никитин^{a, b}, С. В. Рогожкин^{a, b}

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: fedin-petr1991@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.

После доработки 22.12.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Ресурс ядерных установок, в значительной мере, ограничен деградацией конструкционных или функциональных материалов. Под действием высокоэнергетичных нейтронов в материале возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. Аттестация конструкционных материалов с использованием реакторного облучения занимает несколько лет, а сами образцы материалов становятся активированными, что затрудняет последующие послереакторные испытания. Имитационные эксперименты на пучке тяжелых ионов, позволяющие анализировать радиационную стойкость конструкционных материалов атомных и термоядерных реакторов проводятся в Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККТЭФ НИЦ КИ) с 2009 г. Имитационные эксперименты на ускорителе позволяют провести высокодозные испытания не более чем за несколько суток с контролем условий его проведения (температура образцов мишени, поток ионов, доза облучения). В статье представлено описание проводимых на тяжелоионном ускорителе ТИПр имитационных облучений.

Ключевые слова: тяжелые ионы, линейный ускоритель, имитационное облучение

DOI: 10.56304/S207956292205058X

ВВЕДЕНИЕ

Ресурс ядерных установок, в значительной мере, ограничен деградацией конструкционных или функциональных материалов. Под действием нейтронов в материале возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. Разработка конструкционных материалов для нового поколения ядерных и термоядерных установок требует понимания свойств материалов и изменений микроструктуры в результате нейтронного облучения. Для количественной оценки радиационных дефектов и сравнения уровня повреждений с различным нейтронным спектром и при облучении различными частицами используется количество смещений, которые претерпевает каждый атом в расчете на один атом решетки [сна].

Ионное облучение может вызвать микроструктурные изменения, наблюдаемые в нейтронно-облученных материалах (дислокационные петли, полости, сегрегация растворенных веществ и т.д.), что используется для моделирования воздействия ней-

тронного облучения на материалы ядерных реакторов [1, 2]. Эксперименты по ионному облучению имеют преимущества в скорости проводимых облучений, например, время набора повреждений в материале около 100 сна занимает в реакторе несколько лет, а на ионном ускорителе несколько дней. Также имитационные эксперименты имеют преимущество в отсутствии активации материала и в точном контроле за условиями облучения, таких как температура, флюенс и т.д. К основным отличиям тяжелоионного облучения от нейтронного стоит отнести значительно более высокую скорость наработки радиационных повреждений, а также неравномерный и крайне узкий профиль распределения дефектов и отсутствие наработки радиогенного гелия и водорода.

С 2009 г. [3] ускоритель ТИПр (Тяжело Ионный Прототип) в ККТЭФ НИЦ “Курчатовский институт” используется для моделирования радиационных эффектов в перспективных реакторных конструкционных сталях и сплавах путем облучения ускоренными тяжелыми ионами (Fe, Ti, V, Cu и др.) до уровня повреждения от 0.1 до 100 сна

[4–7]. Облучение сталей производится ионами железа с энергией 5.6 МэВ, чтобы не вносить заметных изменений в химический состав стали.

На текущий момент задачи по наработке дефектов структуры делятся на 3 группы:

1) Ускоренная наработка дефектов структуры в материалах активной зоны ядерных реакторов до доз 150 сна для проведения последующих микроскопических исследований с применением просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии.

2) Нарботка дефектов структуры в перспективных материалах термоядерной энергетики до доз ~10 сна для проведения последующих исследований влияния таких дефектов на захват изотопов водорода (дейтерия и трития).

3) Исследование влияния облучения на эксплуатационные характеристики высокотемпературных сверхпроводников.

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Для определения величины и профиля повреждения облученных тяжелыми ионами образцов используется код SRIM (Stopping and Range of Ions in Materials) [8]. Моделирование имплантации ионов Fe и потерь энергии проводится по методике, описанной в [9]. Для моделирования как правило используется режим SRIM “Распределение ионов и быстрый расчет повреждения” (Ion Distribution and Quick Calculation of Damage) со следующими параметрами: 1) пучок ионов Fe с энергией 5.6 МэВ, облучающий образец из 100% железа (либо сплава Fe с различным содержанием Cr) под углом 90° к поверхности образца; 2) пороговая энергия смещения 40 эВ (для случая, когда материалом мишени является сталь); 3) энергия связи решетки – 0 эВ. Согласно [9] для расчета повреждений $N_d(x)$ [сна] используется выражение:

$$N_d(x) = 0.8 \frac{f_{Fe} E_0(x)}{n_{Fe} 2E_d} \cdot 10^8, \quad (1)$$

где x – глубина образца, f_{Fe} – флюенс от пучка ионов железа [см⁻²], $n_{Fe} = 8.48 \cdot 10^{22}$ см⁻³ – концентрация атомов (Fe–10%Cr), $E_d = 40$ эВ – энергия смещения, $E_0(x) \left[\frac{\text{эВ}}{\text{Å}} \right]$ – энергия пучка ионов за вычетом ионизационных потерь в материале (той части энергии, которая пошла на возбуждение и ионизацию атомов мишени), 10^8 – множитель для перевода из Å в см.

На рис. 1 представлен график распределения по глубине имплантации ионов железа (красная линия) и график распределения повреждений в сна (синяя кривая), рассчитанных по формуле (1) для дозы облучения 10^{16} см⁻². Для проводимых мик-

роскопических исследований область исследуемых эффектов, генерируемых ионным пучком, имеет ограничения по глубине образца. Нижний предел обусловлен близостью к поверхности образца, являющейся сильным стоком, на котором происходит отжиг формируемых радиационно-индуцированных дефектов. Также в поверхностном слое практически всегда присутствуют дефекты и загрязнения, обусловленные приготовлением образцов. В облученных при комнатной температуре материалах на глубинах не менее 100 нм обычно наблюдается искаженная картина формирования структурных дефектов. Верхний предел определяется требованием исключить область с повышенной концентрацией имплантированных ионов. Имплантируемые ионы могут вызывать искажения и напряжения в деформируемой кристаллической решетке, что может выражаться в наблюдении избыточного числа структурных дефектов. Повышенные температуры образца приводит к усилению диффузии радиационных дефектов и элементов к стокам в области поверхности и расширению зоны влияния имплантированных ионов, что приводит к уменьшению эффективного диапазона глубин для анализа и исследования радиационно-индуцированных дефектов. В работе [10] проведен анализ профиля глубины ионного облучения образцов сталь Fe–10%Cr, облученных пучком ионов Fe, который использовался для определения верхнего и нижнего пределов глубины для исследования дефектов в зависимости от энергии ионов и температуры облучения. В условиях облучения до дозы ≈100 сна и температуры до 500°С выбирается область исследования от 300 нм до 1000 нм. По графику на рис. 1 видно, что для флюенса 10^{16} см⁻² величина повреждений для глубины 300 нм составляет ≈3 сна, а на глубине 1000 нм составляет ≈6 сна.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР

Тяжело-ионный ускоритель ТИПр представляет собой линейный ускоритель RFQ (Radio Frequency Quadrupole), работающий с длительностью импульса ионного пучка 450 мкс и частотой повторения один импульс в две секунды. Схема ТИПр показана на рис. 2. Пучок ионов металла генерируется с использованием вакуумно-дугового источника ионов металлов (ВДИИМ). Для генерации пучка ионов газа может использоваться источник ионов типа дуоплазматрон [11]. В структуре RFQ пучок ускоряется до полной энергии 101 кэВ на нуклон (5.6 МэВ для железа). Структура RFQ была изготовлена для ускорения тяжелых ионов с отношением массы к заряду вплоть до 60 [12]. Выходной канал включает три магнитные квадрупольные линзы, отвечающие за формирование поперечного профиля пучка на мишени.

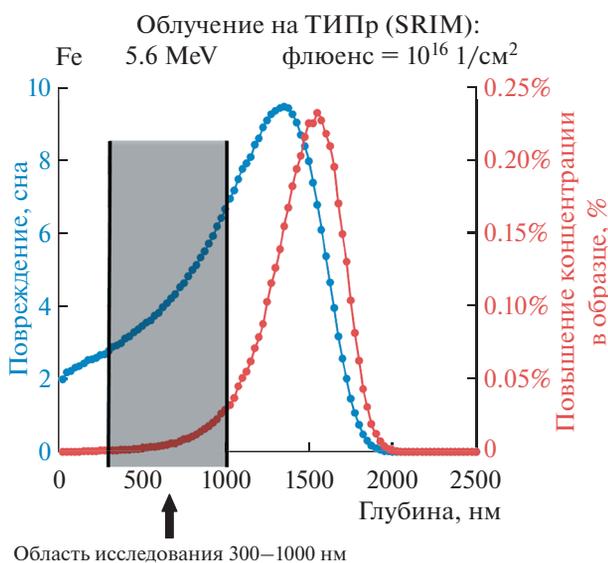


Рис. 1. Графики распределения имплантации ионов железа и созданных повреждений по глубине образца.

Методика облучения экспериментальных образцов представляет собой следующую последовательность действий:

- 1) Держатель с предварительно установленными в него образцами материалов устанавливается в мишенной камере и подключается к нагревательному элементу с диапазоном температур до 600°C.
- 2) Мишенная камера откачивается системой безмасляной откачки до давления менее 10^{-6} торр.
- 3) Происходит нагрев образцов до заданной температуры. Контроль за температурой ведется с помощью двух термопар.
- 4) Проводится облучение пучком ионов с необходимой фокусировкой. Мишенная камера оснащена профилометром, расположенным непосредственно перед держателем образцов, что обеспечивает измерение поперечного размера пучка непосредственно в ходе облучения [13, 14].

После окончания процедуры облучения образцы материалов извлекаются из держателя и направляются на дальнейшие исследования.

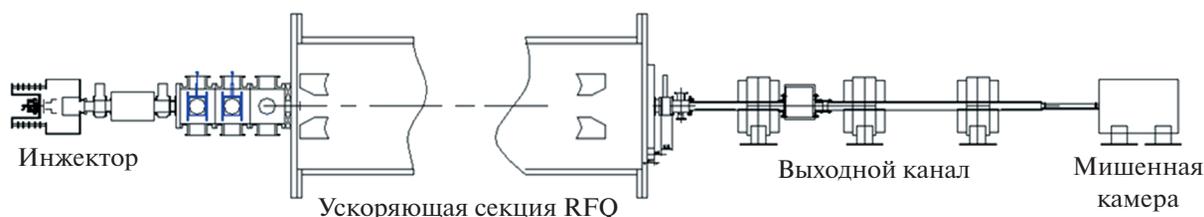


Рис. 2. Схема ускорителя ТИПр.

РЕЖИМЫ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Облучаемые на ТИПр образцы имеют различный форм фактор. Для исследований микроструктуры на просвечивающем электронном микроскопе облучаются образцы в форме диска Ø3 мм и толщиной 0.1–0.3 мм. Для установки под пучок используется держатель, в котором может быть установлено до семи таких образцов. Образцы крепятся на медной основе и фиксируются крышкой из нержавеющей стали (рис. 3а). При необходимости достижения больших доз (100–150 сна) облучается только один образец, установленный в центре держателя. Для облучения одного образца Ø3 мм используется аксиально симметричный пучок с профилями, показанными на рис. 4. Разброс по флюенсу по площади образца в данном режиме составляет $\pm 7\%$. Максимальный импульсный ток пучка ионов Fe^{2+} на площади образца в этом режиме облучения составляет 200 мкА с плотностью тока 2.15 мА/см². Средняя скорость набора флюенса равна $5.75 \cdot 10^{15}$ частиц/см² за один час. На глубине образца 1000 нм скорость набора повреждений составляет 3.45 сна/ч.

Также облучаются образцы перспективных материалов термоядерных реакторов (низкоактивируемые стали, сплавы вольфрама, бронза) размером 10×10 мм [15]. После облучения образцы этих материалов используются для исследования влияния созданных дефектов структуры на захват изотопов водорода из газовой фазы и при облучении плазмой. Для этих образцов используется держатель, в который может быть установлено до четырех образцов (рис. 3б). Для облучения всех образцов 10×10 мм используется аксиально симметричный пучок с профилями, показанными на рис. 5. Разброс по флюенсу по площади образцов в данном режиме составляет $\pm 10\%$ [16]. Максимальный импульсный ток пучка ионов Fe^{2+} на площади всех четырех образцов в этом режиме облучения составляет 180 мкА с плотностью тока 45 мкА/см². Средняя скорость набора флюенса равна $1.2 \cdot 10^{14}$ частиц/см² за один час. На глубине образца 1000 нм скорость набора повреждений составляет 0.07 сна/ч.

Также на ускорителе ТИПр проводятся исследования на радиационную стойкость высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [17]. На-

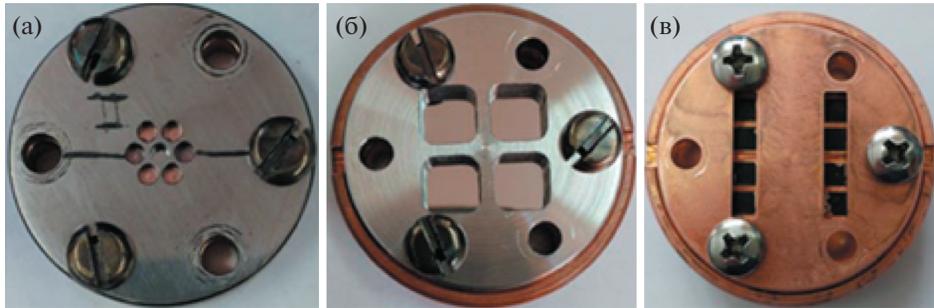


Рис. 3. Фотографии держателей образцов различных форм факторов.

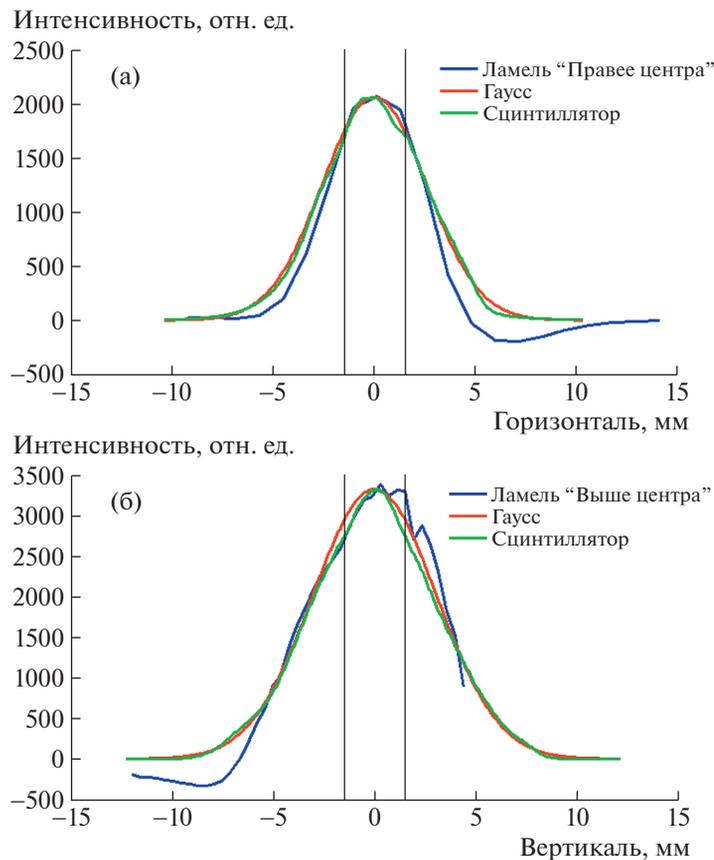


Рис. 4. Горизонтальный (а) и вертикальный (б) профили пучка для облучения одного образца $\varnothing 3$ мм.

работка дефектов в ВТСП лентах может оказывать критическое влияние на эксплуатационные и вольтамперные характеристики. Для этих образцов используется держатель, в который может быть установлено до четырех лент ВТСП шириной 4 мм (рис. 3в). Четыре ленты укладываются по горизонтали на медной основе и фиксируются медной крышкой с двумя вертикальными прорезями по 4 мм. Таким образом получается восемь областей по 4×4 мм для облучения. Из-за малых требуемых флюенсов используется режим с выключенными квадрупольными линзами в выход-

ном канале ТИПр. Разброс по флюенсу по площади образца в данном режиме составляет $\pm 15\%$. Импульсный ток пучка ионов Fe^{2+} на площади образца в этом режиме облучения составляет 20 мкА с плотностью тока 12 мкА/см^2 . Средняя скорость набора флюенса равна $3.2 \cdot 10^{13}$ частиц/см² за один час.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На тяжелоионном ускорителе ТИПр отработана методика облучения образцов пучком ионов железа

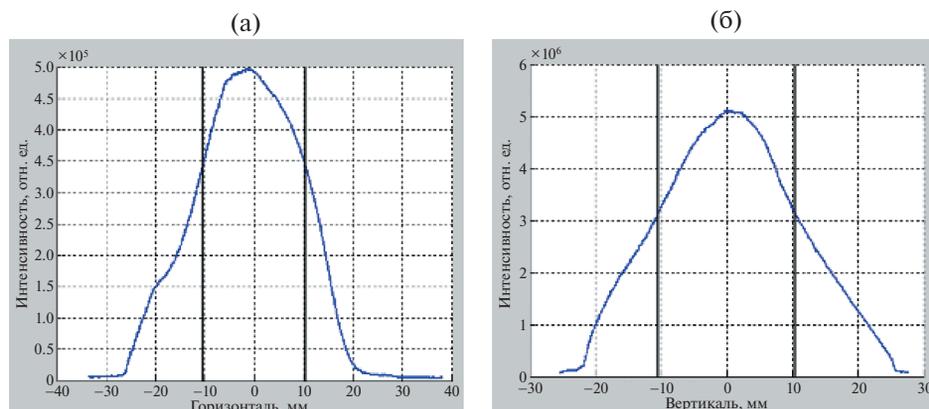


Рис. 5. Горизонтальный (а) и вертикальный (б) профили пучка для облучения четырех образцов $10 \cdot 10$ мм.

Fe^{2+} 5.6 МэВ для проведения имитационных экспериментов по созданию микроструктурных дефектов. В основном используются три различных режима облучения: один образец $\text{O}3$ мм — со скоростью $5.75 \cdot 10^{15}$ частиц/см²/час; четыре образца 10×10 мм — со скоростью $1.2 \cdot 10^{14}$ частиц/см²/час; восемь областей по 4×4 мм — со скоростью $3.2 \cdot 10^{13}$ частиц/см²/час. Облучения могут проводиться при постоянной температуре образцов в диапазоне от комнатной до 600°C.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы по отработке имитационных испытаний перспективных конструкционных материалов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах и материалов термоядерных реакторов выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-1352). Работы по отработке имитационных испытаний ВТСП-материалов выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-21-00085. В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru/>) НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Воеводин В.Н., Неклюдов И.М. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов. 2006. Киев: Наукова думка.
2. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искадаров Н.А., Хорошилов В.В., Богачев А.А., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Куйбида Р.П., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю., Кравчук К.С., Усеинов А.С. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9 (3). С. 245–258.

3. Kulevoy T., Aleev A., Ivanov S., Kozlov A., Kropachev G., Kuibeda R., Nikitin A., Rogozhkin S., Semennikov A., Sharkov B., Zaluzhnyi A. // Proc. Int. Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators. 2009. V. AP/P5 07. P. 1.
4. Fedin P., Saratovskikh M., Kuibeda R., Sitnikov A., Kulevoy T., Nikitin A., Rogozhkin S. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1115. P. 3.
5. Rogozhkin S., Nikitin A., Orlov N., Bogachev A., Korchuganova O., Aleev A., Zaluzhnyi A., Kulevoy T., Linday R., Möslang A., Vladimirov P. // MRS Adv. 2017. V. 2. P. 1143–1155.
6. Rogozhkin S., Schastlivaya I., Leonov V., Nikitin A., Orlov N., Kozodaev M., Vasiliev A., Orekhov A. // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2017. V. 8. P. 848–860.
7. Rogozhkin S., Iskandarov N., Nikitin A., Khomich A., Khoroshilov V., Bogachev A., Lukyanchuk A., Raznitsyn O., Shutov A., Kulevoy T., Fedin P., Vasiliev A., Presnyakov M., Leontyeva-Smirnova M., Mozhanov E., Nikitina A. // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2020. V. 11. P. 359–365.
8. Ziegler J., Ziegler M., Biersak J. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2010. V. 268. P. 1818–1823.
9. Stoller R., Toloczko M., Was G., Certain A., Dwaraknath S., Garner F. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2013. V. 310. P. 75–80.
10. Zinkle S.J., Snead L.L. // Scr. Mater. 2018. V. 143. P. 154–160.
11. Kulevoy T., Chalykh B., Fedin P., Sitnikov A., Kozlov A., Kuibeda R., Andrianov S., Orlov N., Kravchuk K., Rogozhkin S., Useinov A., Oks E., Bogachev A., Nikitin A., Iskandarov N., Golubev A. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 02C102.
12. Kashinsky D., Kolomiets A., Kulevoy T., Kuybida R., Kuzmichov V., Minaev S., Pershin V., Sharkov B., Vengrov R., Yaramishev S. // Proc. 7th Eur. Particle Accelerator Conf. EPAC 2000. P. 854–856.
13. Куйбида Р.П., Кулевой Т.В., Чалых Б.Б., Семенников А.И., Крочачев Г.Н., Стоякин И.А., Черица А.О., Фертман А.Д., Алеев А.А., Никитин А.А., Орлов Н.Н., Рогожкин С.В. // Вопросы атомной науки и техники. 2012. № 4. С. 68–70.

14. Chalykh B., Kozlov A., Kuibeda R., Andrianov S., Aparin D., Fedin P., Orlov N., Nikitin A., Bogachev A., Aleev A., Andreev A., Kropachev G., Iskandarov N., Golubev A., Rogozhkin R., Kulevoy T. // Proc. 24th Russian Particle Accelerator Conference RuPAC2014. P. 269–271.
15. Spitsyn A., Bobyr N., Kulevoy T., Fedin P., Semennikov A., Stolbunov V. // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. P. 1313–1316.
16. Прянишников К.Е., Федин П.А., Куйбида Р.П., Хабибуллина Е.Р., Бобырь Н.П., Кулевоу Т.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2020. Т. 11 (3). С. 166–170.
17. Rudnev I., Abin D., Pokrovskii S., Anishchenko I., Starikovskii A., Osipov M., Kulevoy T., Fedin P., Pryanishnikov K., Batulin R., Khamov A. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (4). P. 1–5.

Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr

P. A. Fedin^{1, *}, K. E. Pryanishnikov^{1,2}, A. V. Ziyatdinova¹, A. V. Kozlov¹, R. P. Kuybida¹, T. V. Kulevoy^{1,2}, N. P. Bobyr¹, D. A. Abin², I. A. Rudnev², A. A. Nikitin^{1,2}, and S. V. Rogozhkin^{1,2}

¹National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: fedin-petr1991@yandex.ru

Received July 26, 2022; revised December 22, 2022; accepted January 26, 2023

Abstract—The resource of nuclear facilities is largely limited by the degradation of structural or functional materials. Under the action of high-energy neutrons, defects in the crystal lattice appear in the material and the accumulation of transmutation products (helium and hydrogen) occurs in the structure of the material. Qualification of structural materials using reactor irradiation takes several years, and the samples of materials themselves become activated, which makes subsequent post-reactor tests difficult. Simulation experiments on a beam of heavy ions making it possible to analyze the radiation resistance of structural materials of nuclear and fusion reactors have been carried out at the Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics (National Research Center Kurchatov Institute) since 2009. Simulation experiments at an accelerator make it possible to carry out high-dose tests in no more than a few days with control over the conditions of the irradiation (temperature of target samples, ion flux, radiation dose). The paper presents a description of the simulation irradiations carried out at the HIPr heavy ion accelerator.

Keywords: heavy ions, linear accelerator, simulation irradiation