

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.663

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ВОЛЬФРАМА И СТАЛИ НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР-1

© 2020 г. К. Е. Прянишников^{а, б}, П. А. Федин^{а, с, *}, Р. П. Куйбида^{а, с},
Е. Р. Хабибуллина^{а, с}, Н. П. Бобырь^с, Т. В. Кулевой^{а, с}

^аИнститут теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, ул. Б. Черемушкинская 25, Москва, 117218 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

^сНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

*E-mail: Fedin@itep.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 09.07.2020 г.

Принята к публикации 10.07.2020 г.

В работе представлены результаты модернизации ускорителя ТИПр для облучений образцов из вольфрама с форм фактором 10×10 мм с целью имитации радиационно-индуцированных дефектов. Описана система измерения тока пучка, созданная для проведения экспериментов по облучению мишеней. Представлены результаты моделирования транспортировки пучка в выходном канале ускорителя и результаты измерений поперечных профилей пучка и тока на образцах.

Ключевые слова: тяжелые ионы, линейный ускоритель, имитационное облучение, моделирование динамики пучка

DOI: 10.1134/S207956292001011X

ВВЕДЕНИЕ

Разработка современных ядерных и термо-ядерных реакторов требует использования устойчивых к радиационному воздействию конструкционных и функциональных материалов. В термоядерных реакторах возникает потребность в материалах для покрытия внутренних стенок вакуумной камеры, устойчивых к большим потокам плазмы, излучения и нейтронов высоких энергий. Одним из подобных материалов, является вольфрам и его сплавы с другими элементами [1]. Вольфрам отличается исключительными термомеханическими свойствами, высокой температурой плавления и теплопроводностью, что и позволяет использовать его в наиболее энергонапряженных местах установках. Именно на вольфрамовые части дивертора ИТЭР будут приходиться максимальные потоки ионов топлива — дейтерия и трития. Исследование радиационной стойкости материалов термоядерных реакторов, а также влияние нарабатываемых в ходе облучения дефектов их кристаллической структуры на эксплуатационные характеристики является важной задачей. Облучение пучками тяжелых ионов может быть ис-

пользовано в качестве метода экспресс-моделирования перед проведением более полного исследования материалов на радиационную стойкость под нейтронным потоком. Имитационные эксперименты по радиационному повреждению образцов материалов, проводимые с помощью ускорителей, по сравнению с подобными экспериментами в реакторах отличаются быстротой выполнения и отсутствием наведенной радиоактивности.

В НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ на тяжелоионном ускорителе ТИПр с 2009 года выполняются эксперименты [2, 3] по облучению материалов ядерных реакторов для исследований радиационной устойчивости. Линейный ускоритель тяжелых ионов ТИПр разработан для ускорения тяжелых ионов до энергий 101 кэВ/нуклон с отношением массы к заряду до 60 [4]. Схема ТИПр представлена на рис. 1. Линейный ускоритель ТИПр работает в импульсном режиме с длительностью импульса 450 мкс при частоте повторения до одного импульса в две секунды. На ускорителе ТИПр установлен вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ или MEVVA) [5].

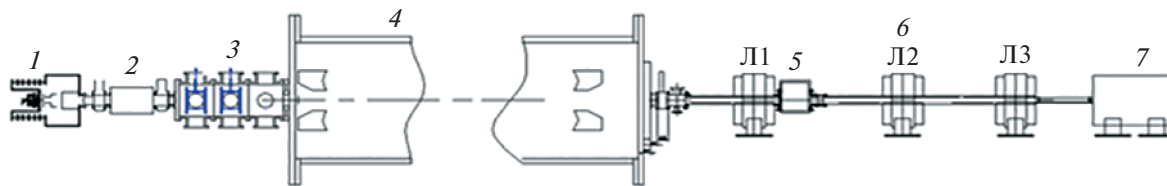


Рис. 1. Схема ТИПр: 1 – инжектор, 2 – камера наблюдения №1, 3 – электростатические линзы, 4 – структура с ПОКФ, 5 – камера наблюдения №2, 6 – квадрупольные линзы Л1, Л2, Л3, 7 – камера мишени.

При проведении работ по облучению материалов ядерных реакторов (преимущественно сталей и сплавов циркония) для последующего экспресс-анализа изменения структуры и свойств материалов использовался пучок ионов железа с энергией 5.6 МэВ. Геометрия мишенного узла позволяла проводить одновременное облучение до трех образцов диаметром 3 мм при потоке ионов на один образец до 100 мкА в диапазоне температур от комнатной до 500°C.

В 2018 году начаты работы по изучению радиационной стойкости образцов вольфрама с фактором $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Облучение вольфрама ионами железа с энергией 5.6 МэВ позволяет создать профиль повреждений на глубину до 1.3 мкм с максимумом на глубине 1 мкм. Причем, примесь атомов железа, вносимая в вольфрам в процессе облучения с флуенсом 10^{14} см^{-2} , незначительна и не оказывает какого-либо влияния на дальнейшие исследования. По аналогии с предыдущими работами [6] был проведен поиск оптимальной конфигурации размещения образцов и моделирование распределения профиля распределения пучка для случаев облучения одного или четырех образцов одновременно. Для проведения эксперимента был изготовлен новый держатель для четырех образцов и профилометр [7–9]. Выходной канал ускорителя имел участок с узкой апертурой, что вызывало потери пучка, в результате чего ток на образцах не превышал 100 мкА. Для снижения этих потерь узкий участок был заменен и проделана работа по поиску нового режима облучения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Проведено моделирование динамики пучка ионов Fe^{2+} в канале вывода ускорителя ТИПр для облучения четырех подобных образцов (область облучения $21 \times 21 \text{ мм}$). Режим настройки квадрупольных линз был выбран как компромисс между равномерностью облучения и интенсивностью. Огибающие пучка в канале показаны на рис. 2. Профили пучка в координате расположения об-

разцов показаны на рис. 3а, полный ток при этом равен 830 мкА. Для точного контроля тока пучка, приходящего на образцы, непосредственно перед ними установлен коллиматор квадратного сечения размером $21 \times 21 \text{ мм}$. Профили пучка после коллиматора показаны на рис. 3б. Расчетный ток на образцах равняется 305 мкА. В данном режиме перепад от максимальной до минимальной плотности тока на образцах равен 15%. Таким образом замена узкого участка канала и новый режим позволили повысить интенсивность приблизительно в три раза.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

Для выбранного по результатам моделирования динамики пучка рабочего режима работы квадрупольных линз было проведено измерение профиля пучка. Перед держателем образцов расположена система измерения ионного пучка профилометр и токоприемник с супрессором, предназначенный для определения тока пучка и размеров пучка в районе мишени. Профилометр содержит пять вертикальных и пять горизонтальных медных измерительных проволок (ламелей) диаметром 1 мм. Внешний вид профилометра с названиями ламелей показан на рис. 4.

В квадрупольных линзах Л2 и Л3 (рис. 1, поз. 6) расположены дополнительные обмотки. Изменяя ток в дополнительных обмотках, можно изменять угол поворота пучка и смещать центр пучка, тем самым сканируя пучком по измерительной ламели. Методика проведения измерения профиля пучка и перевод тока в дополнительных обмотках в расстояние, на которое перемещается пучок на мишени, описаны в [10]. На рис. 5а и 5б показаны измеренные вертикальный и горизонтальный профили пучка соответственно.

Из выполненных измерений горизонтального и вертикального профилей пучка следует, что по горизонтали (рис. 5а) мишень покрывается пучком полностью и с однородностью $\pm 10\%$ в области мишени (21 мм). При центрированном пучке сигналы с симметричных ламелей равны, а на

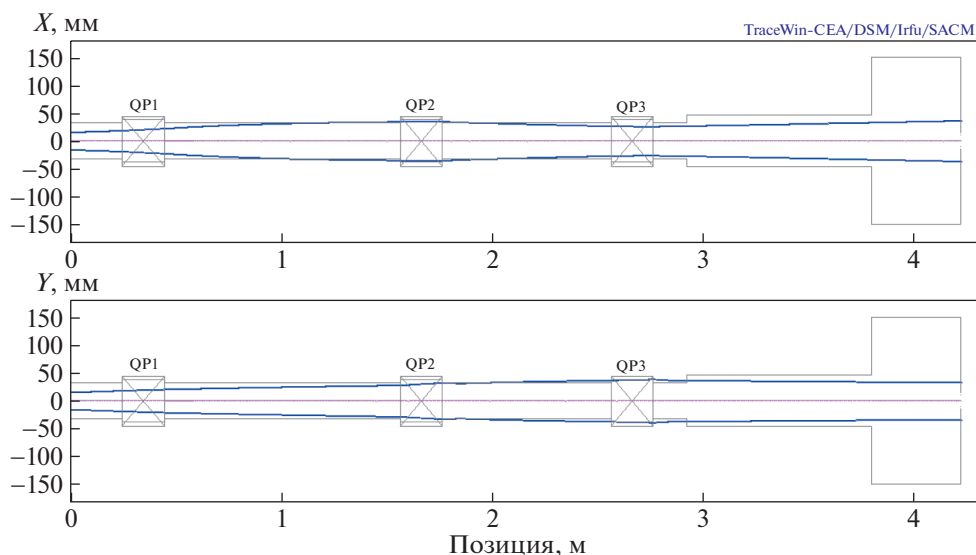


Рис. 2. Огибающие пучка в канале вывода пучка: X – горизонтальная плоскость, Y – вертикальная плоскость.

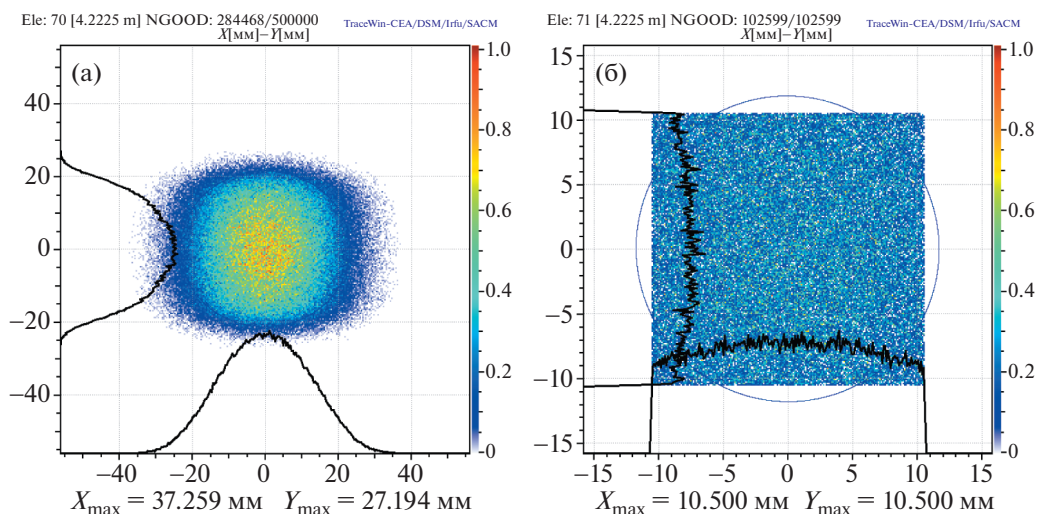


Рис. 3. Профили пучка на мишени до коллиматора (а) и после коллиматора (б), X – горизонтальная плоскость, Y – вертикальная плоскость.

центральной ламели значение тока максимально. Во время проведения имитационного эксперимента набранная доза рассчитывается исходя из снимаемого с двух перпендикулярных ламелей сигнала и используя коэффициенты, рассчитанные для известного профиля пучка.

Для корректных измерений тока пучка на образцах конструкция профилометра включает в себя электрод-супрессор для подавления тока

вторичных электронов с измерителя тока пучка после коллиматора. Для этого на него подается отрицательный потенциал. Измеренная зависимость тока на токоприемнике от значения потенциала на супрессоре представлена на рис. 6. Начиная с -250 В на супрессоре ток пучка больше не изменяется, что свидетельствует о полном подавлении тока вторичных электронов, при этом ток пучка равен 280 мкА.

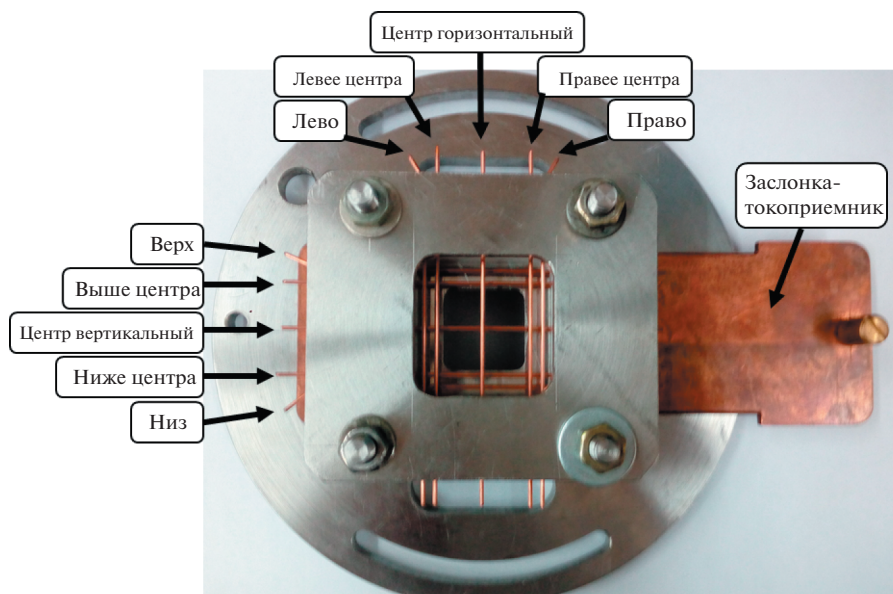


Рис. 4. Устройство профилометра ионного пучка.

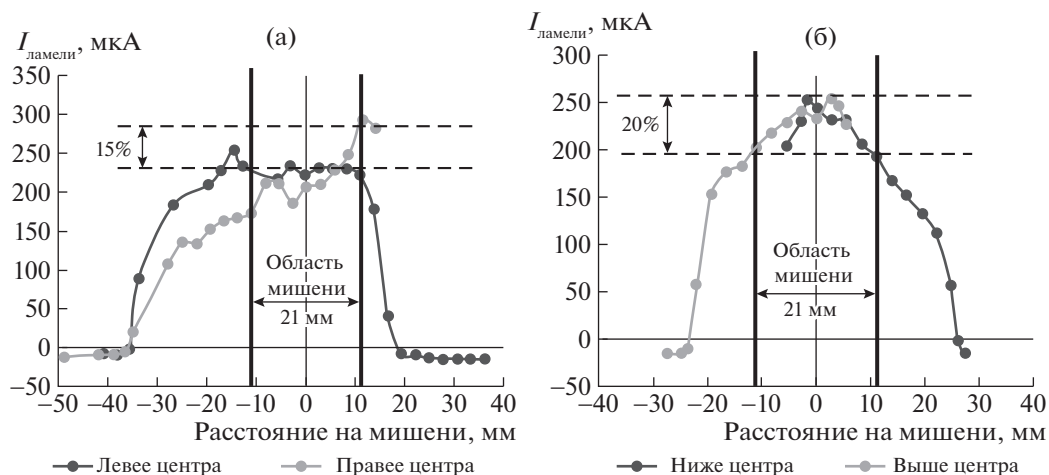


Рис. 5. Зависимость тока на ламелях от расстояния на мишени: (а) горизонтальный профиль; (б) вертикальный профиль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения интенсивности облучения четырех образцов с форм-фактором $10 \times 10 \text{ мм}^2$ на ускорителе ТИПр был заменен узкий участок канала вывода пучка, с помощью моделирования был найден новый рабочий режим транспортировки пучка. Выполненные измерения профиля пучка ионов железа, показывают, что значение плотности тока пучка по площади поверхности образцов не меняются более чем на 20% и суммарный ток на четыре образца равен 280 мкА. Данные параметры

пучка полностью соответствуют требованиям проведения эксперимента по облучению образцов на ускорителе ТИПр для исследования радиационной стойкости материалов термоядерных реакторов, а также влияния нарабатываемых в ходе облучения дефектов на их эксплуатационные характеристики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт” (Приказ № 1570 от 16.07.2019).

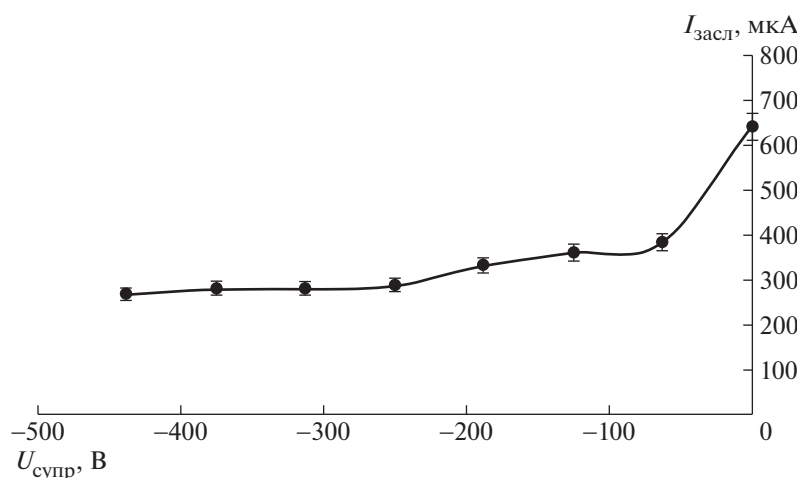


Рис. 6. Зависимость тока на токоприемнике от напряжения на супрессоре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Gilbert M.R. et al. // J. Nucl. Mater. 2014. V. 442. P. 755.
2. Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Khomich A.A. et al. // Yad. Fiz. Inzhin. 2019. V. 9. No. 3. P. 245–258 (in Russian).
3. Kulevoy T., Aleev A., Ivanov S., Kozlov A., Kropachev G., Kuibeda R., Nikitin A., Rogozhkin S., Semennikov A., Sharkov B., Zaluzhny A. // Proc. Intl. Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators. 2009. V. AP/P5 07. P. 1. <https://doi.org/10.1134/S2079562918030120>
4. Kashinsky D., Kolomiets A., Kulevoy T., Kuybida R., Kuzmichov V., Minaev S., Pershin V., Sharkov B., Vengrov R., Yaramishev S. // Proc. EPAC. 2000. P. 854.
5. Kulevoy T., Chalyhk B., Fedin P., Kozlov A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 02C102. <https://doi.org/10.1063/1.4932386>
6. Fedin P.A., Saratovskikh M.S., Kuibeda R.P., Sitnikov A.L., Kulevoy T.V., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1115. P. 032026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032026>
7. Spitsyn A., Bobyr N., Kulevoy T., Fedin P., Semennikov A., Stolbunov V. // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146A. P. 1313–1316. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.065>
8. Bobyr N.P., Fedin P.A., Spitsyn A.V., Semennikov A.I., Kulevoy T.V. // Patent RF No. 186334. 2018 (in Russian).
9. Bobyr N.P., Semennikov A.I., Fedin P.A., Kulevoy T.V., Spitsyn A.V. // Patent RF No. 187849. 2018 (in Russian).
10. Fedin P.A., Kuibeda R.P., Saratovskikh M.S., Chalyhk B.B., Sitnikov A.L., Kulevoy T.V. // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fiz. 2016. V. 59. No. 9-3. P. 293–296 (in Russian).

Preparation and Performance of Irradiation Experiments on the HIPr-1 Heavy Ion Accelerator for Express Analysis of Tungsten and Steel

K. E. Pryanishnikov^{1, 2}, P. A. Fedin^{1, 3, *}, R. P. Kuibeda^{1, 3},
E. R. Khabibullina^{1, 3}, N. P. Bobyr³, and T. V. Kulevoy^{1, 3}

¹ Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Kurchatov Institute, Moscow, 117218 Russia

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

³ National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: Fedin@itep.ru

Received June 4, 2020; revised July 9, 2020; accepted July 10, 2020

Abstract—This article discusses modernization of the HIPr accelerator for irradiation of tungsten samples with a 10×10 mm form factor aimed at simulating radiation induced defects. The measurement system of the beam current is developed for experiments on target irradiation. The simulation results of beam transport in the accelerator output channel are presented with the measurements of beam transversal profiles and current in the samples.

Keywords: heavy ions, linear accelerator, imitation irradiation, beam dynamics simulation