

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.663

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ  
ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
РЕАКТОРОВ НА УСКОРИТЕЛЕ ТИПр

© 2021 г. К. Е. Прянишников<sup>a</sup>, П. А. Федин<sup>a, b, \*</sup>,  
Р. П. Куйбida<sup>a, b</sup>, А. Ю. Лукашин<sup>a, b</sup>, Т. В. Кулевой<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра  
“Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

\*E-mail: fedin@itep.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 01.07.2021 г.

В работе представлены результаты экспериментов, выполненных в ходе работ по подготовке ускорителя ТИПр к сеансам облучений образцов конструкционных материалов реакторов с целью имитации радиационно-индукционных дефектов. Приведен способ измерения профиля пучка с помощью ПЗС-камеры. Представлены результаты времепролетных измерений пучка ионов железа на базе ускорителя ТИПр с ускоряющей структурой RFQ.

**Ключевые слова:** тяжелые ионы, линейный ускоритель, имитационное облучение, ПЗС-камера, времепролетные измерения

**DOI:** 10.56304/S2079562920060469

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование радиационной стойкости материалов ядерных и термоядерных реакторов, а также влияния образующихся в ходе радиационного воздействия дефектов их кристаллической структуры на эксплуатационные характеристики является важной прикладной задачей. Конструкционные материалы для ядерных и термоядерных реакторов должны выдерживать высокие нейтронные потоки и высокие температуры. Выбор материалов осуществляется на основе проведенной аттестации их радиационной стойкости. Такие аттестации обычно проводятся в исследовательских реакторах, однако, это занимает значительный промежуток времени (не менее десяти лет), что обуславливает интерес к проведению имитационных экспериментов нейтронного воздействия на пучках тяжелых ионов [1]. Это позволяет сократить набор необходимого количества смещений на атом (сна) в исследуемом материале до нескольких суток и даже часов. Таким образом проведение облучения пучками тяжелых ионов образцов материалов является методом экспресс-моделирования, и может выступать в качестве предварительной стадии тестирования конструкционных материалов. Имитационные эксперименты на ускорителях тяжелых ионов не активируют образцы, что удоб-

но для проведения микро- и макроскопических исследований результатов экспериментов.

В НИЦ “Курчатовский институт” – ИТЭФ на тяжелоионном ускорителе ТИПр с 2009 года проводятся эксперименты [2, 3] по облучению материалов ядерных реакторов для исследований радиационной устойчивости. Установка ТИПр разработана для ускорения тяжелых ионов с отношением массы к заряду до 60 до энергий 101 кэВ/нуклон [4]. Схема ускорителя представлена на рис. 1. Линейный ускоритель ТИПр работает в импульсном режиме с длительностью импульса 475 мкс при частоте повторения до одного импульса в две секунды. На ускорителе установлен вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ).

При проведении работ по облучению материалов ядерных реакторов (преимущественно сталей и сплавов циркония) для последующего экспресс-анализа изменения структуры и свойств материалов используется пучок ионов железа с энергией 5.6 МэВ, в соответствие с принципом проведения таких экспериментов, описанным в [5]. Облучение одного образца материала диаметром 3 мм проводится при потоке ионов на один образец до 250 мкА в диапазоне температур от комнатной до 500°C.

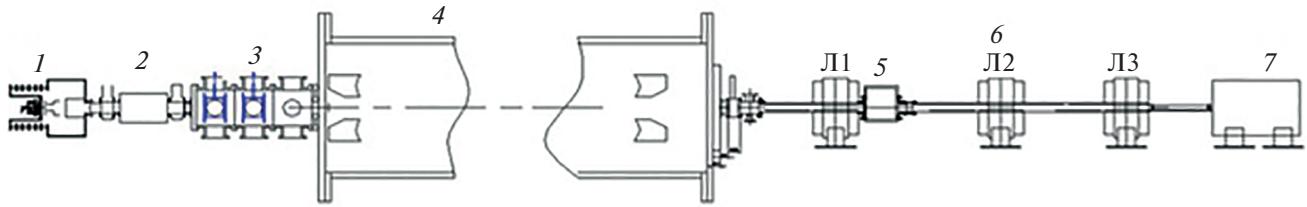


Рис. 1. Схема ТИПр: 1 – инжектор; 2 – камера наблюдения № 1; 3 – электростатические линзы; 4 – структура с ПОКФ; 5 – камера наблюдения № 2; 6 – квадрупольные линзы Л1, Л2, Л3; 7 – камера мишени.

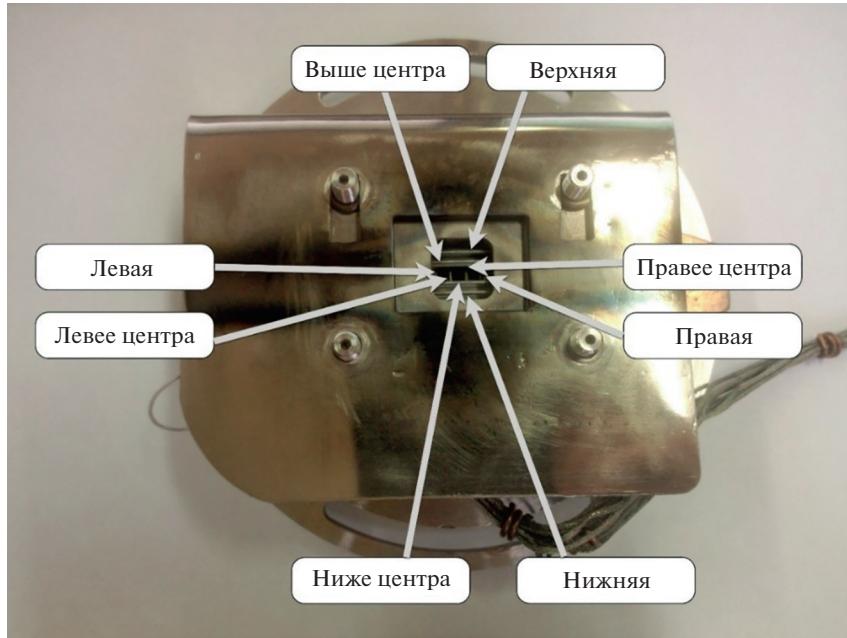


Рис. 2. Устройство профилометра ионного пучка.

В связи с выполненной модернизацией канала вывода пучка, а также обновлением блоков питания квадрупольных линз, что заметно повысило стабильность их параметров, была проведена настройка и поиск рабочего режима облучения для образцов конструкционных материалов реакторов диаметром 3 мм.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

Для обеспечения требуемой в имитационных экспериментах равномерности пучка на мишени (отклонение от максимального тока на 20% по образцу) была проведена настройка режима работы квадрупольных линз. Измерения проводились двумя способами: с использованием штатного профилометра и с помощью сцинтиллятора, устанавливаемого в плоскости расположения облучаемых образцов. Штатная система измерения ионного пучка выполнена в виде профилометра. Внешний вид профилометра с названиями ламелей показан на

рис. 2. Профилометр содержит пять вертикальных и пять горизонтальных медных измерительных проволок (ламелей) диаметром 1 мм. Данный профилометр используется не только при настройке пучка на мишень, но и для онлайн-контроля за пучком во время облучения. Держатель образцов располагается сразу после профилометра. Пучок сканирует ламели мишени и снимается сигнал с двух симметрично расположенных относительно центра ламелей, на основании сигналов строятся профили пучка. Способ измерения профиля пучка с использованием профилометра подробно описан в [6].

Для получения более полной информации о поперечном распределении ионов в пучке, на место расположения облучаемых образцов был установлен сцинтиллятор и проведено измерение профиля пучка с его помощью (см. рис. 3). Сигнал со сцинтиллятора фиксировался ПЗС-камерой SDU-285. Экспозиция, установленная на ПЗС-камере, составляла 40 мкс. ПЗС-камера оптического формата 2/3, с разрешением 1392 × 1032, размер ПЗС 8.77 ×

$\times 6.6$  мм, а размер пикселя  $6.45 \times 6.45$  мкм. Съемка проходила при длительности пучка 40 мкс.

Полученные с использованием сцинтиллятора снимки пучка были преобразованы с использованием математических программ обработки изображений (Matlab [7]) в интенсивность тока пучка. В результате обработки получены вертикальный и горизонтальный профили пучка. На рис. 4 приведены профили пучка, полученные с использованием сцинтиллятора, профилометра, и для сравнения показано распределение Гаусса, построенное по результатам измерения профилометром.

По результатам проведенных измерений можно утверждать, что поперечное распределение тока ионов в пучке, измеряемое в ходе экспериментальных работ с использованием проволочного профилометра, совпадает с результатами измерений, проведенных с использованием сцинтиллятора, и имеет гауссово распределение. Однако, из рис. 4 видно, что измеряемый с ламелей сигнал принимает отрицательные значения на краях пучка. Вызвано это, предположительно, вторичными электронами.

### ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Зарядовое распределение пучка ионов железа, генерируемого вакуумно-дуговым источником, определялось перед ускоряющей структурой времяпролетным методом [8]. В основе времяпролетного метода измерения распределения ионов пучка лежит принцип различия скоростей ионов с разным отношением массы к заряду после их ускорения в электростатическом поле. Расстояние между источником и токоприемником составило 2.5 м. Токоприемник расположен после электростатических линз (рис. 1, поз. 3), которые были выключены во время измерения, и представляет собой пластину без каких-либо подавителей вторичных электронов.

Для проведения измерений на ионном источнике из полного импульса источника в 475 мкс вырезался из начала целого импульса короткий сигнал длительностью 1 мкс. На рис. 5 показано распределение интенсивности сигнала с этого токоприемника. Затем проведено исследование полного импульса, вырезанием короткого сигнала из разных частей импульса. Исследование показало, что в полном импульсе пучка перед RFQ содержится 67% ионов  $Fe^{+2}$ , 17% ионов  $Fe^{+3}$  и 16% ионов  $Fe^{+1}$ .

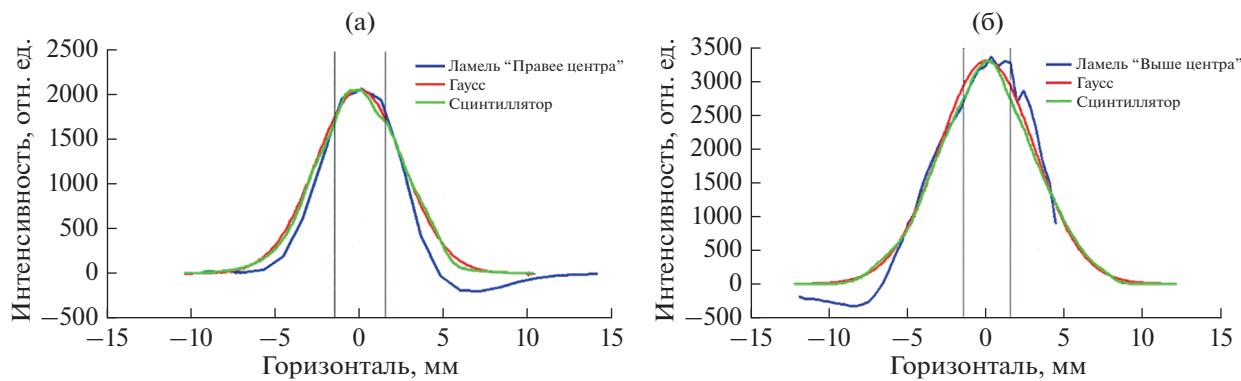
Проведено измерение распределения зарядового состояния пучка ионов железа после ускорения в RFQ. Токоприемник представляет собой медную пластину, установленную в камере наблюдения № 2 (рис. 1, поз. 5), полностью перекрывающую пучок, сигнал с которой выводится на осциллограф. Перед токоприемником установлен цилиндрический электрод, выполняющий роль супрессора



Рис. 3. Внешний вид сцинтиллятора.

вторичных электронов. На супрессор подается отрицательный потенциал  $-400$  В, что достаточно для подавления потока вторичных электронов с токоприемника [9].

Для проведения измерений распределения ионов по зарядам после ускорения на ионном источнике из полного импульса источника в 475 мкс вырезался из начала целого импульса сигнал длительностью 1 мкс. Канал согласования в виде электростатических линз после ионного источника, а также ускоряющая структура работали в таком режиме, как и при проведении имитационных экспериментов. На рис. 6 показана осциллограмма полученного сигнала с токоприемника. На представленной осциллограмме видны пики, соответствующие ускоренным ионам железа  $Fe^{3+}$  и  $Fe^{2+}$ . Отношение не меняется при изменении места вырезания короткого импульса из полного импульса.



**Рис. 4.** Распределение интенсивности пучка в плоскости расположения мишени: горизонтальный профиль (а), вертикальный профиль (б).

Исходя из полученных значений видно, что интенсивность пучка ионов  $\text{Fe}^{2+}$  более чем в 20 раз превышает интенсивность ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Это связано с тем, что остальные частицы  $\text{Fe}^{+3}$  не ускорились в RFQ.

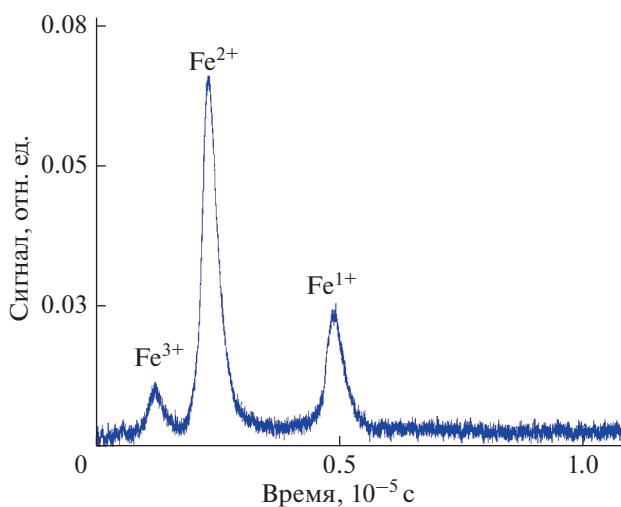
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью проверки работы канала вывода пучка после его модернизации была выполнена работа по поиску и экспериментальной проверке рабочего режима транспортировки пучка от ускоряющей структуры до мишени. Проведенные измерения профиля пучка ионов железа, показывают, что значение плотности тока пучка по площади поверхности образца не меняется более чем на 20%. Измерения тока пучка, выполненные с заслонки-профилометра после диафрагмы диаметром 3 мм, для данного режима показали суммарный ток на об-

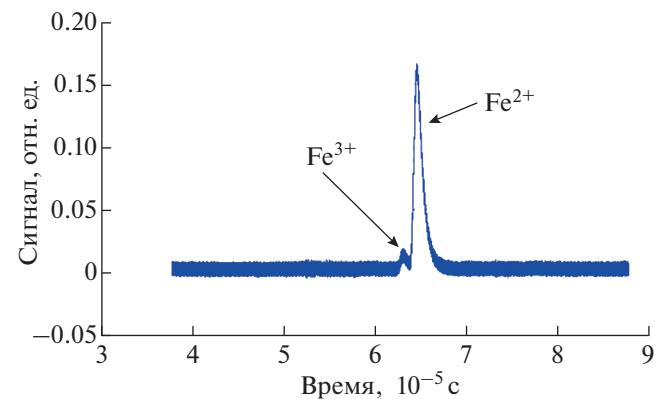
разец равный 250 мкА. Эти параметры пучка полностью соответствуют требованиям проведения имитационного эксперимента по облучению образцов на ускорителе ТИПр до повреждающей дозы 100 и выше сна с целью исследования радиационной стойкости материалов термоядерных реакторов, а также влияния нарабатываемых в ходе облучения дефектов на их эксплуатационные характеристики [5].

Проверка режима работы линз канала вывода с использованием сцинтиллятора и ПЗС-камеры. По сравнению с использованием профилометра ПЗС-камера позволяет более быстро описать профиль пучка и дает более полное представление о распределении интенсивности пучка в поперечном сечении.

Выполненные времяпролетные измерения пучка ускоренных ионов показали, что отношение ионов требуемого зарядового состояния для имитационных экспериментов  $\text{Fe}^{2+}$  превышает интенсивность тока ионов зарядового состояния  $\text{Fe}^{3+}$  в двадцать раз, что позволяет сделать вывод о до-



**Рис. 5.** Зависимость интенсивности сигнала с детектора от времени.



**Рис. 6.** Зависимость интенсивности сигнала с детектора от времени.

статочной сепарации ионов зарядовых состояний Fe для проведения облучения ионами  $Fe^{2+}$ . Знание зарядового состояния ускоренных ионов необходимо для точного расчета флюенса ускоренных ионов на образцы.

Результаты подготовки позволили провести более 2000 ч облучательных имитационных экспериментов за 2020 г. только для данного формата образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Was G.S. // Fundamentals of Radiation Materials Science. 2007. Berlin: Springer-Verlag.
2. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А. и др. // 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. and Zaluzhny A. // Proc. Intl. Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators. 2009. V. AP/P5 07. P. 1.
4. Kashinsky D., Kolomiets A., Kulevoy T., Kuybida R., Kuzmichov V., Minaev S., Pershin V., Sharkov B., Venugrov R., Yaramishev S. // Proc. EPAC. 2000. P. 854.
5. Stoller R., Toloczko M., Was G., Certain A., Dwaraknath S. and Garner F. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 2013. V. 310. P. 75.
6. Федин П.А., Куйбида Р.П., Саратовских М.С., Чалых Б.Б., Ситников А.Л., Кулевої Т.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2017. Т. 8. № 3. Р. 221–224.
7. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
8. Gushenet V.I., Bugaev A.S., Oks E.M., Kulevoy T.V., Hershcovitch A., Brown I.G. // Rev. Sci. Instrum. 2008. V. 79 (2). P. 02B701.
9. Прянишников К.Е., Федин П.А., Куйбида Р.П., Хаббуллина Е.Р., Бобырь Н.П., Кулевої Т.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2020. Т. 1. № 3. С. 166.

### Preparation and Performance of Irradiation Experiments for Express Analysis of Reactor Structural Materials at Accelerator HIPr

**K. E. Pryanishnikov<sup>1</sup>, P. A. Fedin<sup>1, 2, \*</sup>, R. P. Kuibeda<sup>1, 2</sup>, A.Y. Lukashin<sup>1, 2</sup>, and T. V. Kulevoy<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>*Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics  
of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

<sup>2</sup>*National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

\*e-mail: fedin@itep.ru

Received April 4, 2021; revised June 21, 2021; accepted July 1, 2021

The paper presents the results of experiments carried out during the preparation of the HIPr accelerator for irradiation of reactor structural materials specimens in order to simulate radiation-induced defects. A method for measuring the beam profile using a CCD camera is presented. The results of time-of-flight measurements of  $Fe^{2+}$  ion beam based on HIPr accelerator with an RFQ accelerating structure are presented.

**Keywords:** heavy ions, linear accelerator, imitation irradiation, CCD camera, time-of-flight measurements