

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.3.038.616; 537.5

ДИАГНОСТИКА ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПУЧКА ИОНОВ  
ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ОБЛУЧАЕМОЙ МИШЕНИ

© 2022 г. А. В. Скобляков<sup>а, \*</sup>, А. В. Канцырев<sup>а</sup>, В. А. Панюшкин<sup>а</sup>, А. В. Богданов<sup>а</sup>,  
В. А. Волков<sup>а</sup>, А. А. Голубев<sup>а</sup>, S. Zähler<sup>с</sup>, M. Gyrdymov<sup>с</sup>, О. Н. Розмей<sup>б, с</sup>

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

<sup>б</sup>Центр Гельмгольца GSI, Дармштадт, 64291 Германия

<sup>с</sup>IAP, Университет им. Гете, Франкфурт, 60438 Германия

\*E-mail: dinAlt220@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.02.2022 г.

После доработки 25.02.2022 г.

Принята к публикации 28.02.2022 г.

В предстоящих экспериментах по нагреву мишеней интенсивным пучком тяжелых ионов в рамках проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) измерение профиля пучка на мишени имеет большое значение для получения оптимального энерговклада в облучаемом материале и интерпретации экспериментальных результатов. Предложен метод диагностики поперечного распределения интенсивности ионов на мишени по регистрации рентгеновского излучения, возникающего в мишени под действием ионного пучка. В данной работе с помощью численного кода Geant4 была разработана и построена полномасштабная модель эксперимента и выполнено численное моделирование рентгеновской диагностики ионного пучка. Тестирование предложенного метода и сравнение с результатами моделирования выполнено в экспериментах на ускорителе UNILAC в GSI (Германия) с пучком ионов Au<sup>+26</sup> с энергией 11.4 МэВ/а.е.м., проходящим через медную мишень толщиной 10 мкм. Рентгеновское изображение мишени формировалось с помощью камеры-обскуры на CsI сцинтиляторе и регистрировалось с помощью цифровой sCMOS камеры с усилителем яркости.

**Ключевые слова:** рентгеновская диагностика, geant4, монте-карло моделирование, ионный пучок, ускоритель, fair, камера-обскура, пространственное разрешение

**DOI:** 10.56304/S2079562922030496

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В будущих экспериментах HINEX (Heavy Ion Heating and Expansion – нагрев тяжелыми ионами и расширение), проекта FAIR, высокоинтенсивные ионные пучки будут использоваться для нагрева материала мишени в исследованиях экстремального состояния вещества [1]. В этих экспериментах, которые будут проводиться в рамках научной программы коллаборации HED@FAIR проекта FAIR ([2]), знание о распределении поперечного профиля пучка тяжелых ионов на мишени имеет большое значение для оптимизации профиля энерговыведения в материале мишени и последующего анализа экспериментальных результатов. Предложенная Франкфуртским университетом им. Гете, диагностическая система XCOT (X-ray Conversion and Transport - преобразование рентгеновского излучения в оптическое и транспорт) по регистрации излучения возникающего в мишени, облучаемой ионным пучком [3], позволит измерять, в каждом импульсе, поперечный профиль пучка в плоскости расположения мишени. Интенсивность пучков тяжелых ионов в экс-

периментах HINEX будет достигать величины 10<sup>11</sup> ионов/импульс, что приведет к возникновению высокого радиационного фона. В системе XCOT оптическая схема регистрации позволит поместить цифровую регистрирующую камеру на безопасном расстоянии от области взаимодействия пучок-мишень. Целью данной работы являлось продемонстрировать возможность измерения поперечного профиля пучка ионов по рентгеновскому излучению облучаемой мишени. Задачами работы являлось проведение полномасштабного Монте-Карло моделирования эксперимента, и получение данных о поперечном профиле пучка по рентгеновскому изображению.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ПОЛНОМАСШТАБНАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ

Проведенный, в рамках тестирования XCOT системы эксперимент, был выполнен на линейном ускорителе UNILAC в GSI (г. Дармштадт, Германия). В эксперименте проводилось облучение медной мишени диаметром 3 мм и толщиной

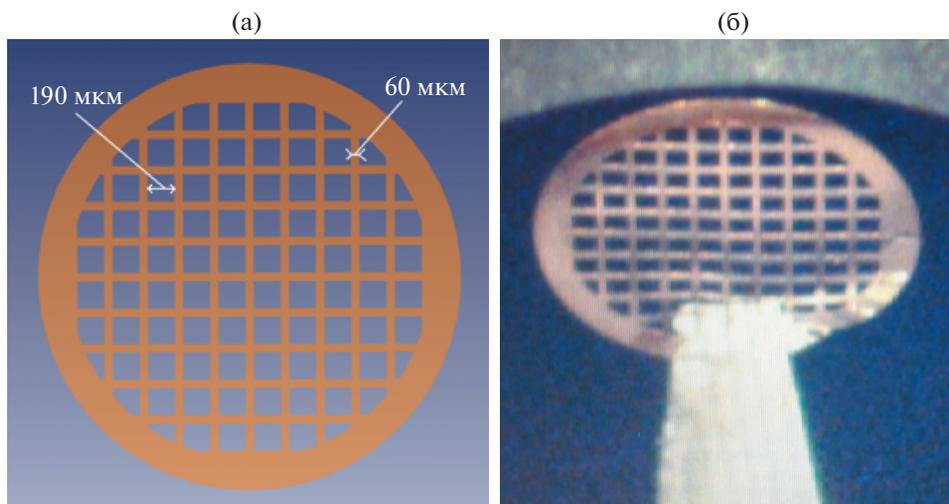


Рис. 1. Чертеж (а) и фотография (б) медной мишени.

10 мкм, выполненной в виде сетки с размерами указанными на рис. 1. Облучение проводилось в течение  $\sim 2$  ч, пучком ионов  $\text{Au}^{+26}$  с энергией 11.4 МэВ/а.е.м. при частоте сбросов  $\sim 3$  Гц. При токе пучка 2–5 мкА плотность потока составляла  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  ионов/мм<sup>2</sup>. Измерение тока пучка проводилось с помощью цилиндра Фарадея, установленного за мишенью. При взаимодействии ионов с материалом мишени возникает рентгеновское излучение с основным вкладом линий  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$  атомов Cu мишени.

В эксперименте полихроматическое рентгеновское изображение мишени формировалось на CsI сцинтиляторе толщиной 100 мкм и размером  $26 \times 26$  мм с помощью камеры-обскуры с 9-ю отверстиями диаметром  $\sim 80$  мкм, каждое – в танталовой фольге толщиной 75 мкм. Расстояние между отверстиями составляло 2.5 мм. Используемый CsI сцинтилятор позволял регистрировать рентгеновское излучение с энергией  $> 5$  кэВ. Конфигурация камеры-обскуры с несколькими отверстиями позволяет при интегрировании получаемых изображений многократно увеличить статистику фотонов на изображении. Расстояния между мишенью и камерой-обскурой и между камерой-обскурой и сцинтилятором составляли 65 и 130 мм, что соответствует двукратному увеличению рентгеновского изображения камерой-обскурой. Угол расположения плоскости мишени по отношению к оси пучка составлял  $45^{\circ}$  (рис. 2). Перед мишенью на расстоянии 120 мм был размещен графитовый коллиматор с отверстием диаметром 3 мм. Мишень, коллиматор, камера-обскура и сцинтилятор размещались в мишенной камере с вакуумом  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  мбар. Для настройки системы регистрации была установлена камера-обскура (рис. 2) с одним отверстием диаметром 80 мкм и аналогичными расстояниями от мишени до плоскости регистрации с

формированием изображения на пленочном детекторе Image plate Fujifilm BAS-TR.

Изображение регистрировалось на sCMOS цифровой камере ANDOR Zyla-5.5-USB3 с электронно-оптическим усилителем яркости ProxiKit System PKS2584 на основе двойной микроканальной пластины (МКП) в шевронной сборке. Цифровая камера располагалась за пределами вакуумной камеры на расстоянии  $\sim 1$  м от мишени. На цифровой камере был установлен объектив Nikon AF VR-Nikkor 80-400 1:4.5-5.6 с установленной макролинзой (3.0 дптр) (рис. 3).

С помощью численного кода Geant4 [4] была разработана и построена полномасштабная модель (рис. 4а) и выполнено численное моделирование эксперимента. Для упрощения учета вклада в формируемое изображение вторичного нейтронного и рентгеновского излучения в модели была задана сферическая мишенная камера, изготовленная из нержавеющей стали, с внутренним радиусом 0.5 м и толщиной стенки 50 мм. Внутри мишенной камеры был задан оптический стол изготовленный из алюминия. Размеры камеры-обскуры, размеры коллиматора и расстояния от мишени до плоскости детектора соответствовали реальному эксперименту. На рис. 4б приведен спектр рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии ионов  $\text{Au}^{+26}$  с медной мишенью, рассчитанный по разработанной модели.

Изображение формировалось на тонком виртуальном детекторе размером  $26 \times 26$  мм с разрешением  $2000 \times 2000$  ячеек. При выполнении моделирования был использован программный пакет физических процессов FTFP\_BERT [5] кода Geant4. Адронная компонента в данном пакете учитывает упругие и неупругие процессы захвата и деления с учетом таблицы сечений взаимодействий. Также данный пакет использует стандарт-

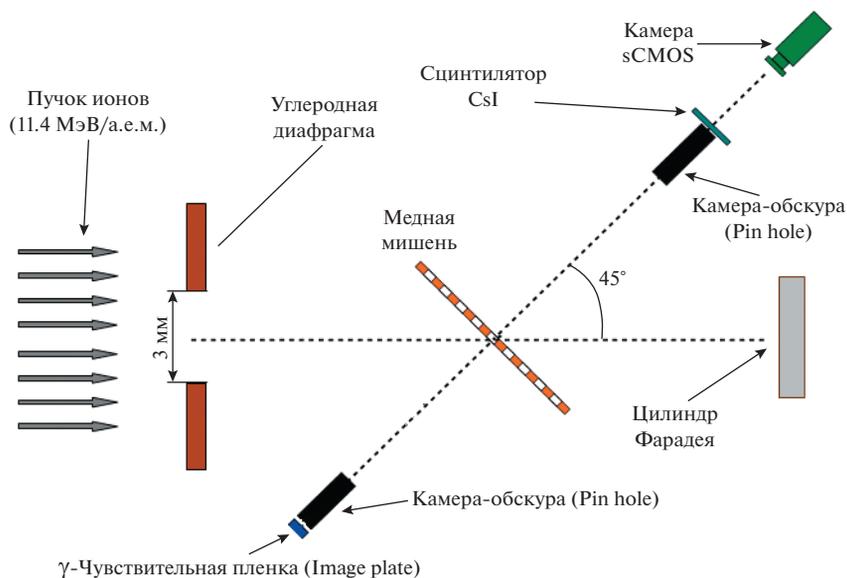


Рис. 2. Схема эксперимента (не в масштабе).

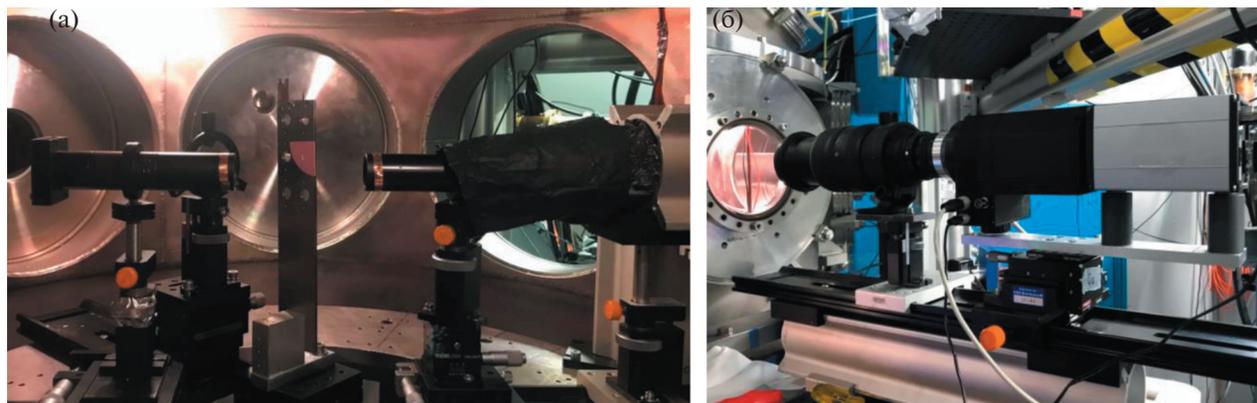


Рис. 3. Фотографии элементов экспериментальной установки: (а) камера-обскура, установленная в вакуумной камере; (б) фотография оптической системы регистрации изображений.

ную электромагнитную физику кода Geant4, созданную процедурой G4EmStandardPhysics для  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\mu^-$ ,  $\mu^+$ ,  $\tau^-$ ,  $\tau^+$  и всех стабильных заряженных адронов и ионов. Распад всех долгоживущих адронов и лептонов обрабатывается процессом G4Decay. Кроме того, использовался программный пакет физики Livermore [5, 6], в котором учтены процессы атомного возбуждения, такие как флуоресценция и Оже-электронная эмиссия (включая Оже-каскады), которые создают вакансии в атомных оболочках.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И СРАВНЕНИЕ С ПРОВЕДЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

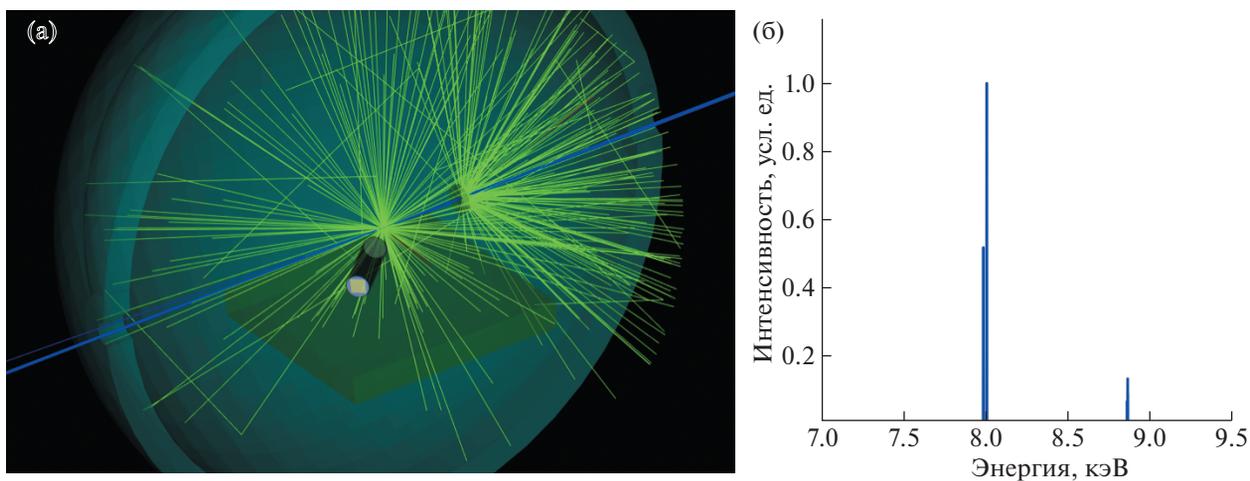
При численном Монте-Карло моделировании рентгеновское изображение мишени рассчитывалось при плотности потока ионов

$\sim 4 \cdot 10^{10}$  ионов/мм<sup>2</sup>, при этом, полученная плотность потока фотонов в плоскости регистрации составляла  $\sim 1.5 \cdot 10^4$  фт./мм<sup>2</sup>. В эксперименте суммарная плотность потока составила  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  ионов/мм<sup>2</sup>. Сравнение полученных модельных и экспериментальных изображений мишени приведено на рис. 5.

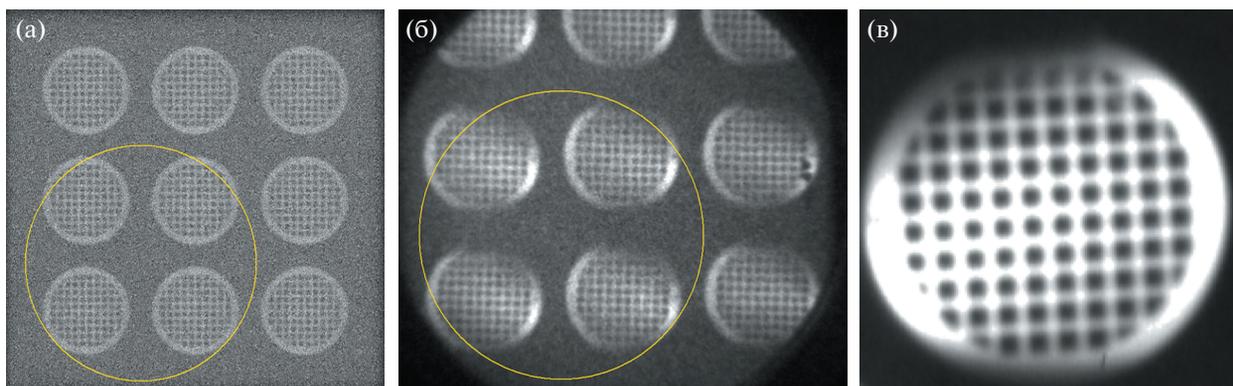
На рис. 6 показаны модельные и экспериментальные изображения мишени, полученные после суммирования четырех изображений, расположенных в левом нижнем углу на рис. 5 (обведены желтой линией).

На рис. 7 показаны соответствующие изображения на рис. 6 горизонтальные и вертикальные профили пучка для моделирования и экспериментальные данные, получаемые на CsI сцинтиляторе.

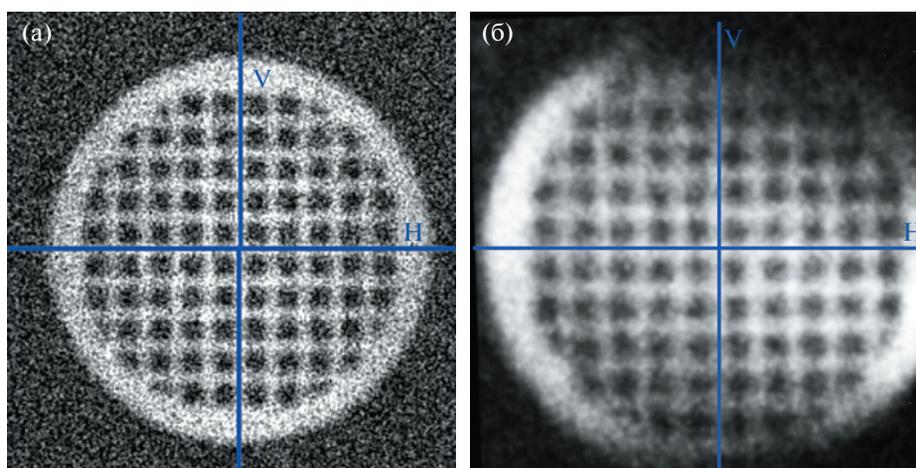
Экспериментальные профили пучка были аппроксимированы с помощью функции Гаус-



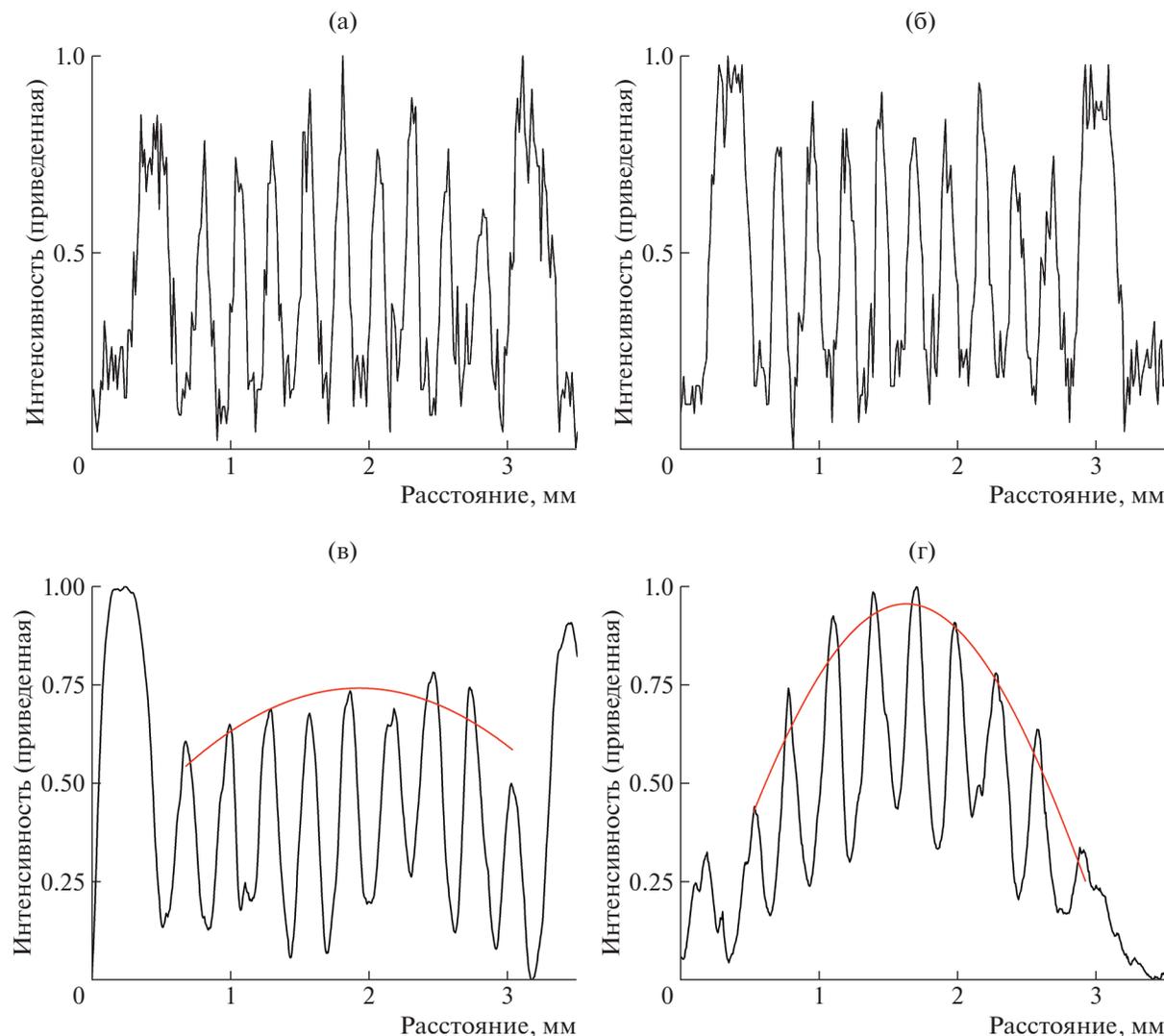
**Рис. 4.** (а) 3D модель (вид сверху) мишенной камеры заданная в коде Geant4. (б) Расчетный спектр рентгеновского излучения.



**Рис. 5.** Рентгеновские изображения мишени: (а) изображение, полученное в результате расчета с использованием кода Geant4; (б) экспериментальное изображение, полученное с помощью цифровой sCMOS камеры; (в) изображение полученное в эксперименте на пленочном детекторе Image plate.



**Рис. 6.** Рентгеновские изображения мишени: (а) суммированное изображение, рассчитанное с помощью кода Geant4; (б) суммированное экспериментальное изображение, записанное цифровой камерой в эксперименте.



**Рис. 7.** Горизонтальные (а, в) и вертикальные (б, г) профили пучка, построенные вдоль синих линий на рис. 6. (а, б) Результаты моделирования в среде Geant4; (в, г) для экспериментального изображения, регистрируемого sCMOS камерой на CsI сцинтилляторе. Красная кривая – аппроксимация поперечного профиля пучка функцией Гаусса.

са (рис. 7, красная кривая), ширина на полувысоте функции Гаусса составила 11.43 мм по горизонтали и 4.26 мм по вертикали. Пространственное разрешение изображений оценивалось путем подбора функции ошибки Erf по горизонтальным поперечным профилям (построенным по изображению одной вертикальной проволоочки мишени на рис. 5): стандартное отклонение  $\sigma \sim 15$  мкм для изображения, полученного с помощью кода Geant4 и  $\sigma \sim 30$  мкм для экспериментального изображения на CsI сцинтилляторе. Размытие на экспериментально полученном изображении, с учетом длительной экспозиции кадра, можно объяснить движением мишени, вызванным температурным расширением материала мишени при выделении энергии пучка ионов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте с пучком ионов  $Au^{+26}$  с энергией 11.4 МэВ/а.е.м. и с помощью численного Монте-Карло моделирования выполнена проверка метода диагностики поперечного профиля пучка тяжелых ионов по регистрации рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии ионов с материалом мишени. Размытие и разница пространственного разрешения изображений для эксперимента ( $\sigma \sim 30$  мкм) и моделирования ( $\sigma \sim 15$  мкм), по-видимому, связана с термическим расширением мишени при длительной экспозиции экспериментальных кадров. Данный эффект потребует дальнейшего уточнения, однако для будущих экспериментов в проекте FAIR вклад данного эффекта незначителен, так

как длительность импульса пучка будет составлять  $\sim 100$  нс и регистрируемая плоскость мишени не будет успевать смещаться за время получения кадра изображения. Важным преимуществом представленной диагностики является возможность работать on-line с получением изображения поперечного профиля пучка на цифровой камере непосредственно после импульса пучка.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта ВМБФ Fkz. 05P19RFFA1 и гранта Министерства Образования и Науки Российской Федерации – Эксперимент № 16 APPA (GSI)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Mintsev V. et al.* // Contrib. Plasma Phys. 2016. V. 56. Nos. 3–4. P. 281–285.
2. *Schönberg K.* // Plasma Phys. 2020. V. 27. No. 4. P. 043103.
3. *Pikuz S.A., Efremov V.P., Rosmej O. et al.* // J. Phys. A: Math. Gen. 2006. V. 39. No. 17. P. 4765.
4. Geant4 Toolkit <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/Book-ForApplicationDevelopers.pdf>.
5. Geant4 Toolkit, physicslist <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/PhysicsList-Guide/fo/PhysicsListGuide.pdf>.
6. Geant4 Toolkit, Low Energy Electromagnetic Physics <https://geant4.web.cern.ch/node/1620>.

## Diagnostics of the Transverse Profile of the Ion Beam on X-ray Radiation of the Irradiated Target

A. V. Skobliakov<sup>1, \*</sup>, A. V. Kantsyrev<sup>1</sup>, V. A. Panyushkin<sup>1</sup>, A. V. Bogdanov<sup>1</sup>,  
V. A. Volkov<sup>1</sup>, A. A. Golubev<sup>1</sup>, S. Zähler<sup>3</sup>, M. Gyrdymov<sup>3</sup>, and O. N. Rosmej<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

<sup>2</sup>Helmholtzzentrum GSI, Darmstadt, 64291 Germany

<sup>3</sup>IAP, Goethe University, Frankfurt, 60438 Germany

\*e-mail: [dinAlt220@yandex.ru](mailto:dinAlt220@yandex.ru)

Received February 23, 2022; revised February 25, 2022; accepted February 28, 2022

**Abstract**—Measurements of the transverse profile of the incident beam have a crucial importance for determining the optimal energy deposition of ions in irradiated material and experimental data interpretation in forthcoming FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) experiments on heating of material by intense heavy ion beams. The diagnostic method of transverse distribution of ion beam intensity on a target by detecting of X-ray radiation arising in the target under irradiation of incident ions is proposed. In this work, using the Geant4 numerical code, a full-scale model of the experiment was developed. Numerical simulation of the X-ray diagnostics of the ion beam was performed. Testing of the proposed method and comparison with the experimental results were made using Au<sup>+26</sup> ion beam with energy 11.4 MeV/a.m.u. from the UNILAC accelerator at GSI (Germany) incident on 10  $\mu\text{m}$  Cu target. The X-Ray image of the target was formed on a CsI scintillator by a pinhole camera and registered by a CMOS camera with an intensity amplifier.

**Keywords:** X-ray diagnostics, geant4, monte-carlo simulation, ion beam, accelerator, fair, pinhole, spatial resolution