

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ПРИ РАБОТЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПРИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПОЛЕТАХ

И.С. Гордеев^{1,2}

¹Государственный университет «Дубна»

²Объединенный институт ядерных исследований

E-mail: gordeev@jinr.ru

Приводится обзор некоторых результатов исследований, проводимых сотрудниками кафедры биофизики Государственного университета «Дубна». Данные исследования посвящены различным аспектам моделирования переноса ионизирующего излучения через вещество при помощи метода Монте-Карло. Обсуждаются результаты прогнозирования радиационной обстановки при работе ускорительного комплекса NICA в ОИЯИ. Затрагивается актуальная задача космической радиобиологии, связанная с моделированием условий космоса и предлагаемый подход к моделированию радиационных условий космоса на ускорителях заряженных частиц.

Ключевые слова: радиационная безопасность, ускорители, Монте-Карло моделирование, космическая радиация

При проектировании ускорителей заряженных частиц огромное внимание уделяется радиационной безопасности. В комплекс NICA Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) входят уникальные ускорители, которые способны предоставлять исследователям высокоэнергетические заряженные частицы для фундаментальных и прикладных исследований в области физики, радиобиологии и медицины [1, 2].

При работе установок комплекса будет формироваться смешанное радиационное поле излучения, обуславливающее радиационную нагрузку на персонал. Так, заряженные частицы высокой энергии, потерянные в процессе ускорения в нуклотроне, взаимодействуют сначала с внутренней стенкой тороидальной вакуумной камеры под малыми углами (несколько градусов). Часть из них ядерно взаимодействует со стенкой камеры, порождая вторичное излучение, часть проходит через камеру без ядерных взаимодействий и облучает внутреннюю поверхность боковой защиты [3].

Для обеспечения безопасности персонала от подобного излучения, вокруг ускорителей возводится биологическая защита, как правило, это бетонные стены (боковая защита) и верхнее перекрытие. С тем, чтобы обосновать радиационную безопасность при работе установок комплекса и определить эффективность возводимой защиты, необходимо проводить комплекс трудоемких расчетов. Для этого специалистами используются специализированные программы транспорта ионизирующего излучения через вещество; наиболее популярные: GEANT4 [4], FLUKA [5, 6], PHITS [7], которые позволяют производить такие оценки путем компьютерного моделирования.

Сотрудниками кафедры биофизики Государственного университета «Дубна» и Лаборатории радиационной биологии (ЛРБ) ОИЯИ, доктором физ.-мат. наук Тимошенко Г.Н. и научным сотрудником Гордеевым И.С. был проведен ряд таких расчетов. На основании результатов проведенного моделирования удалось определить эффективность возводимой защиты и обосновать радиационную безопасность для комплекса NICA при работе ускорителей.

Для обеспечения подобного моделирования необходимо иметь точные данные о параметрах ускорителя, геометрии и местах потерь первичных частиц ускоряемого пучка. Так, специалистами кафедры была детально воспроизведена геометрия здания №1 ЛФВЭ ОИЯИ и находящегося там ускорителя «Нуклотрона», а также массивного яра, оставшегося от магнитов после демонтажа синхрофазотрона (рис. 1).

Внутри яра были воспроизведены элементы магнитной системы и вакуумной камеры бустера. Была детально учтена окружающая биологическая защита.

Значения суммарных эффективных доз при работе ускорителей в окружающей его среде зависит от режимов работы ускорителей, а также длительности работы при каждом режиме и места локализации потерь [3]. В созданной для расчетов геометрии были учтены возможные типы потерь, обусловленные: адиабатическим захватом инжектируемого пучка ионов в режим ускорения; бетатронными колебаниями ионов в фокусирующих магнитных полях ускорителя; выбыванием ионов из фазового объема пучка за счет рекомбинации ионов с электронами системы электронного охлаждения (СЭО) бустера; наличием обдирочной мишени; системой разделения пучка на ионы

целевой и нецелевой зарядности, а также ловушкой пучка ионов нецелевой зарядности.



Рис. 1. Геометрия бустера и «Нуклотрона» внутри здания № 1 комплекса NICA ОИЯИ

На основании расчетов был определен вклад в общую дозу излучения от всех рассматриваемых типов потерь, обоснована радиационная безопасность для комплекса NICA. По результатам работы были выпущены статьи в рецензируемых научных журналах [8, 9]. Тимошенко Г. Н. была издана монография «Радиационная защита высокоэнергетичных ускорителей» [3], в которой рассматриваются вопросы, касающиеся специфики формирования смешанного радиационного поля на высокоэнергетических ускорителях протонов и тяжелых ионов.

В продолжение направления исследований в области радиационной безопасности, сотрудниками кафедры были прочитаны выходы нейтронов из бетонных защит [10]. Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки дозы за биологической защитой, полученные результаты могут быть полезны для разработки полуэмпирических подходов, необходимых для предварительных расчетов лабиринтов на ускорительных комплексах, подобных комплексу NICA ОИЯИ. Как это указывалось ранее, использование программ транспорта излучений в веществе методом Монте-Карло является на данный момент основным методом, используемым для решения подобных задач.

Данных об альbedo нейтронов релятивистских энергий практически нет в литературе ввиду сложившегося мнения, что альbedo нейтронов с энергией более 20 МэВ мало и им можно

пренебречь при решении практических задач [10]. Поэтому был проведен большой объем расчетов, направленных на выявление закономерности величины выхода нейтронов из бетонной мишени от энергии и угла падения нейтронов релятивистских энергий. Схема проводимых расчетов и энергетическая зависимость полного альbedo нейтронов из бетона показана на рис. 2.

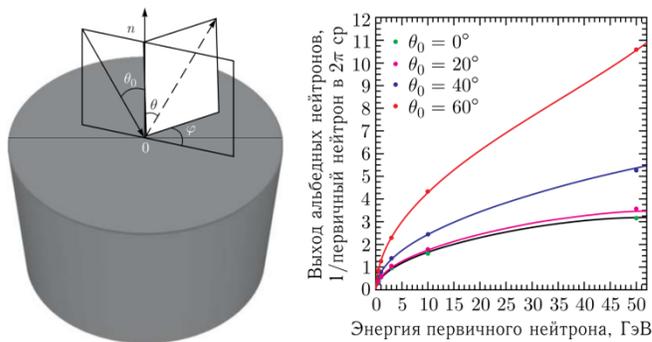


Рис. 2. Схема расчета альbedo нейтронов релятивистских энергий (слева) и аппроксимация полного альbedo нейтронов в диапазоне энергии до 50 ГэВ (справа)

Была предложена формула аппроксимации расчетных данных, погрешность которой составляет $<10\%$ в самом наихудшем случае:

$$Y(E, \theta_0) = b \left(\frac{a}{b} \sqrt{E} + \exp(6.0632 \cdot 10^{-2}) - 2 \right), \quad 1$$

где E — энергия первичных нейтронов (в ГэВ), а параметры a и b зависят от угла падения и размеров бетонной мишени:

$$a(\theta_0, R, D) = a_1 \theta_0^3 + a_2 \exp(\theta_0) + a_3, \quad 2$$

$$b(\theta_0, R, D) = b_1 \theta_0^3 + b_2 \exp(\theta_0) + b_3. \quad 3$$

Здесь θ_0 — угол падения первичного пучка нейтронов (в градусах). Параметры $a_{1,2,3}$ и $b_{1,2,3}$ зависят от конкретной геометрии бетонной мишени [10].

Другой крайне актуальной задачей является улучшение экспериментального сопровождения радиобиологических экспериментов. Тимошенко Г.Н. и Гордеевым И.С. был совместно разработан новый уникальный тип симулятора смешанного поля излучения [11], схожего по своим характеристикам радиационным условиям космоса. Сложное смешанное поле излуче-

ния формируется в космических аппаратах, при взаимодействии галактических космических лучей (ГКЛ) с корпусом аппарата и внутренним содержимым. Как следствие, происходит ослабление первичного излучения, а также генерация вторичного излучения за счет фрагментации первичных тяжелых заряженных частиц, которые входят в состав ГКЛ (рис. 3). Подобные подходы к моделированию радиационных условий космоса были реализованы лишь в нескольких крупнейших мировых научных центрах [12, 13]. Предложение по реализации в рамках комплекса NISA было опубликовано авторами в рецензируемых научных работах [11, 14].

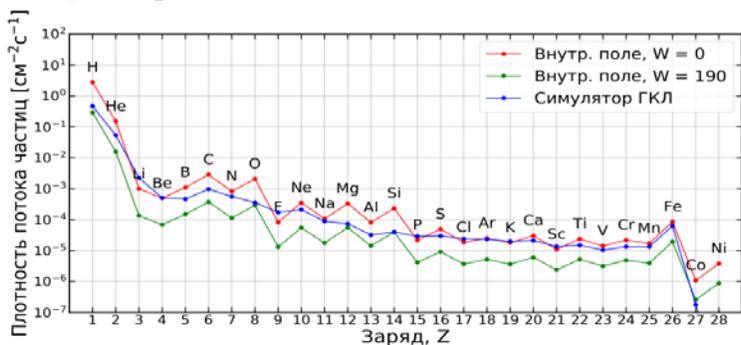


Рис. 3. Сравнение зарядового распределения компонентов внутреннего радиационного поля космического аппарата при минимуме ($W = 0$) и максимуме ($W = 190$) СА с распределением от разрабатываемого симулятора ГКЛ

Состоятельность предлагаемого подхода была обоснована путем компьютерного моделирования [11]. Показано, что предлагаемая схема симулятора способна воспроизводить зарядовое распределение внутреннего радиационного поля космического аппарата и спектральные характеристики. Общая схема предлагаемой установки приведена на рис. 4. Планируется, что подход будет реализован на одном из прикладных каналов комплекса NISA ОИЯИ.

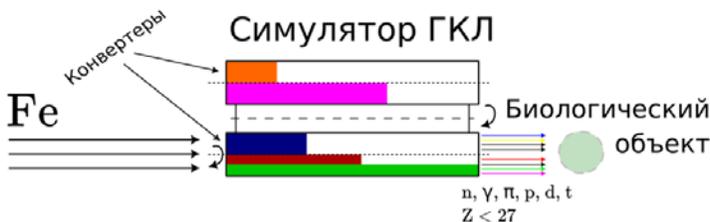


Рис. 4. Схема симулятора ГКЛ

Список литературы

1. NICA heavy-ion collider at JINR (Dubna). Status of accelerator complex and first physics at NICA [Text] / G. Trubnikov et al 2023 // Journal of Physics: Conference Series 2586 012013
2. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex [Text] / A. Slivin [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2022. — Vol. 19, no. 5. — P. 528—531.
3. Тимошенко, Г. Н. Радиационная защита высокоэнергетических ускорителей [Текст] / Г. Н. Тимошенко. — Дубна : ОИЯИ, 2022. — 111 с.
4. Geant4 — a simulation toolkit [Text] / S. Agostinelli [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003.— Vol. 506, no. 3. — P. 250—303.
5. C. Ahdida, et al "New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code", Frontiers in Physics 9, 788253 (2022).
6. G. Battistoni, et al "Overview of the FLUKA code", Annals of Nuclear Energy 82, 10-18 (2015).
7. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02 [Text] / T. Sato [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. — 2018. — June. — Vol. 55, no. 6. — P. 684—690. — URL: <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>.
8. Forecasting Radiation Environment around the NICA Booster [Text] / G.N. Timoshenko & I.S. Gordeev // Physics of Particles and Nuclei Letters, vol. 17, n. 3, pp. 379 – 388 2020 DOI: 10.1134/S1547477120030152
9. Prediction of Radiation Environment around NICA Complex [Text] / G.N. Timoshenko & I.S. Gordeev // Physics and Technique of Accelerators, vol. 19, pp. 123 – 128 (2022)
10. Albedo of Neutrons of Relativistic Energies [Text] / I.S. Gordeev & G.N. Timoshenko // Physics of Particles and Nuclei Letters, vol. 19, pp. 402 – 407 2022 DOI: 10.1134/S1547477122040136

11. A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space [Text] / I.S. Gordeev & G.N. Timoshenko // Life Sciences in Space Research, vol. 30, pp. 66 – 71 (2021)
12. Reference field specification and preliminary beam selection strategy for accelerator-based GCR simulation [Text] : trans. from the English by / T. C. Slaba [et al.] // Life Sciences in Space Research. — 2016. — Vol. 8. — P. 52—67. — URL: [_https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214552416000031](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214552416000031).
13. Schuy, C. Hybrid Active-Passive Space Radiation Simulation Concept for GSI and the Future FAIR Facility [Text] / C. Schuy, U. Weber, M. Durante // Frontiers in Physics. — 2020. — Vol. 8.
14. Timoshenko, G. N. Reference Radiation Field for GCR Chronic Exposure Simulation [Text] / G. N. Timoshenko, I. S. Gordeev // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2021. — Vol. 18, no. 7. — P. 799–805.