

изменение концентрации радона от этажа помещений, на котором проводились измерения. Так, концентрация радона в помещениях первых этажей выше, чем на вторых этажах аналогичных помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиологическая защита от облучения радоном. Перевод публикации 126 МКРЗ / под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. 92 с.
2. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
3. Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Шосафарова Ш.Г., Махмудова М.М. Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 68–73. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73.
4. Источники и действие ионизирующего излучения. Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Отчёт НКДАР ООН Генеральной Ассамблеи, VI: Источники.–ООН, Нью-Йорк, 2000.–654 с.
5. Источники и действие ионизирующего излучения. Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Отчёт НКДАР ООН 2006 Генеральной Ассамблеи, I: Sources.–UN, NY, 2008.–392с.

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА НЕЙТРОНОВ 4-ГО КАНАЛА ЦИКЛИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ Р7-М COMPUTATIONAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF NEUTRON BEAM OF 4-TH CHANNEL OF CYCLIC ACCELERATOR R7-M

**А. Е. Овсенёв, М. В. Гладких, Н. В. Смольников,
М. Н. Аникин, А. Г. Наймушин, И. И. Лебедев И.В. Ломов
A. Ovsenev, M. Gladkikh, N. Smolnikov, M. Anikin,
A. Naymushin, I. Lebedev, I. Lomov**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
г. Томск Россия
aeo3@tpu.ru
National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia*

В данной работе описано создание расчетной модели источника нейтронов на базе 4-го канала циклического ускорителя Р7-М в программном комплексе PHITS для определения нейтронно-физических характеристик пучка нейтронного излучения. Получены энергетическое и угловое распределение плотности потока нейтронов, а также получены значения плотности потока нейтронов в диапазоне энергий от 0,01 эВ до 15 МэВ.

This article describes the creation of a computational model of a neutron source based on the 4-th channel of the P7-M cyclic accelerator in the PHITS software package for determining the neutron-physical characteristics of a neutron radiation beam. The energy and angular distribution of the neutron flux density are obtained, and the values of the neutron flux density in the energy range from 0.01 eV to 15 MeV are obtained.

Ключевые слова: циклический ускоритель, экспериментальный канал, мишень, нейтронный пучок, энергетическое распределение, угловое распределение, аппроксимация.

Keywords: cyclotron, experimental channel, target, neutron beam, energy development, angular development, approximation.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-197-201>

Введение. Ускорители частиц играют важную роль в современной физике, медицине и промышленности, обеспечивая доступ к высокоэнергетическим пучкам различных заряженных частиц. Одним из ключевых аспектов использования ускорителей является их потенциал в качестве источников нейтронов. Нейтроны имеют особую значимость в различных областях исследований, таких как ядерная физика, медицинская диагностика и терапия, промышленные приложения и безопасность ядерной энергетики.

На сегодняшний момент в ТПУ работает и активно используется циклический ускоритель Р-7М [1]. Однако, проблема отсутствия как универсальной модели источника нейтронов, так и полноценной модели экспериментальных каналов стоит особенно остро, в следствие того, что ускоритель используется в целях нейтронной терапии [2]. Выявление закономерностей формирования пучка нейтронного излучения и дальнейшая постройка модели источника на основе данных закономерностей позволила бы существенно упростить и ускорить работы, связанные с оценкой дозовых нагрузок на пациента.

Теоретические основы. Нейтроны являются вторичным излучением ускорителя и возникают в результате взаимодействия пучков высокоэнергетических частиц с материалом мишени. На 4-м канале циклического ускорителя Р-7М (рисунок 1) интенсивные потоки быстрых нейтронов получают путем бомбардировки ускоренными дейтронами бериллиевой мишени. На рисунке 2 показаны примеры относительных спектров нейтронов при бомбардировке дейтронами толстых Be мишеней с энергией дейтронов от 7,5 МэВ до 54 МэВ. Средняя энергия нейтронов примерно в 0,4 раза больше энергии дейтрона.

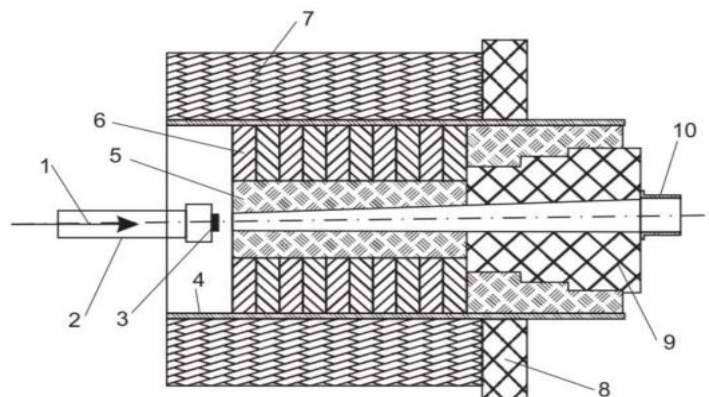


Рисунок 1 – Коллиматор нейтронного пучка: 1 – пучок дейтронов; 2 – канал ионного пучка; 3 – Be -мишень; 4 – железная труба; 5 – полиэтиленовый коллиматор; 6 – железные диски; 7 – бетонная стена; 8 – радиационная защита из полиэтилена; 9 – съемный полиэтиленовый коллиматор; 10 – конус

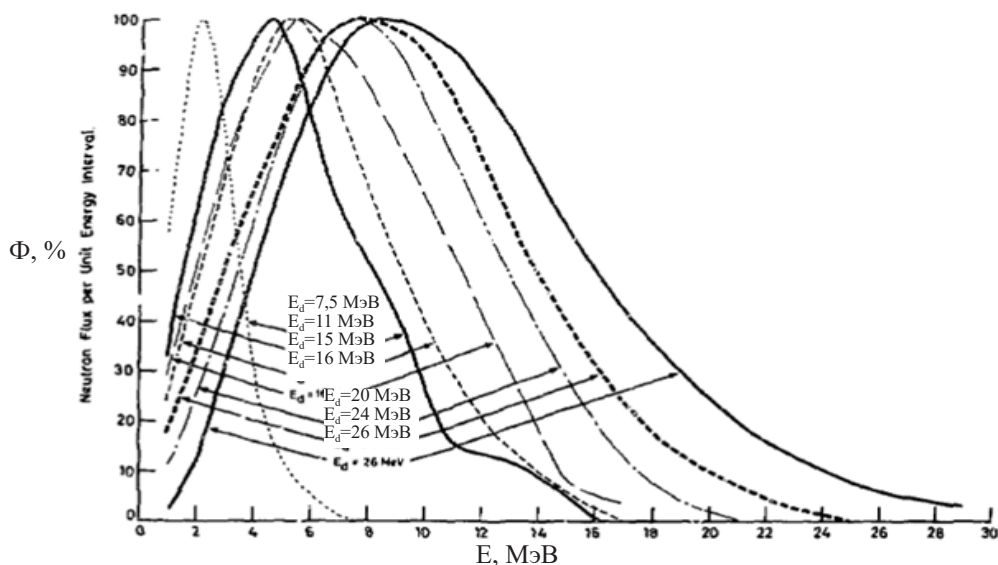


Рисунок 2 – Относительные спектры нейтронов, вылетевших под углом 0° из толстых мишеней Be , бомбардированных дейтронами [3]

Помимо энергетических характеристик, изучение угловых распределений нейтронов, получаемых на ускорителях, является важной задачей в области исследований ядерной физики. Это связано с тем, что угловое распределение нейтронов определяет характер распространения излучения и его взаимодействия с окружающей средой, что является ключевым фактором для эффективной работы во многих сферах.

К.А. Вивер в своей работе [4] экспериментально получил и описал угловые распределения для различных типов мишени в широком диапазоне энергий дейтронов (рисунок 3). Энергии дейтронов на рисунке 3 находятся в следующем диапазоне:

а – дейтроны с энергией 9, 14 и 18 МэВ на тонкой бериллиевой мишени;
 б – дейтроны с энергией 9, 14 и 18 МэВ на толстой бериллиевой мишени;
 в – дейтроны с энергией 19 МэВ на толстой литиевой мишени и дейтроны с энергией 18 МэВ на толстой углеродной мишени.

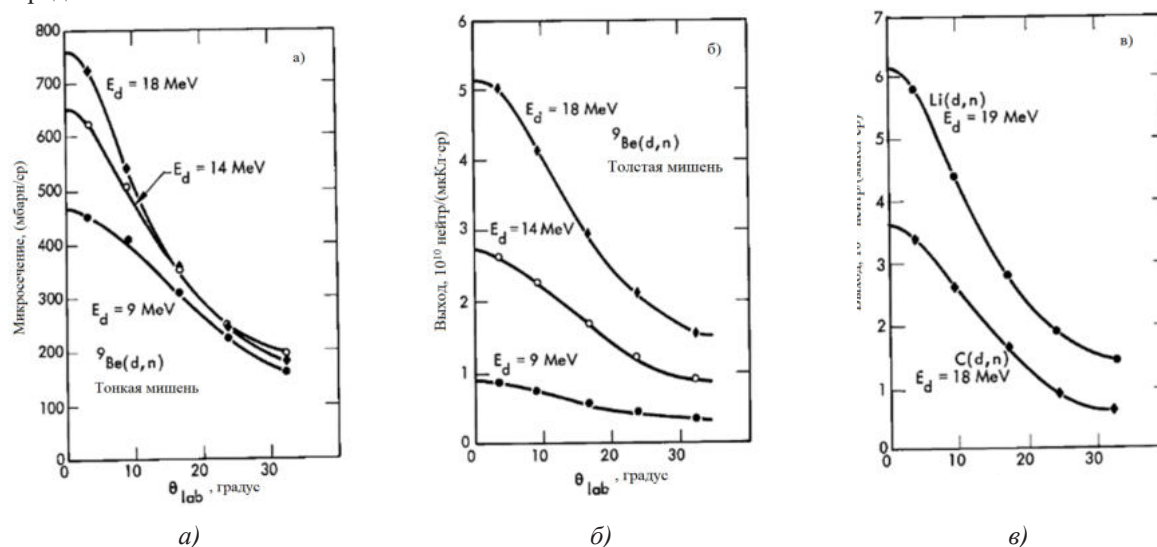


Рисунок 3 – Угловое распределение образования нейтронов, интегрированное по энергии нейтронов

Расчетная модель. На основании результатов работы [5] по созданию составного источника для моделирования столкновительных реакций на базе циклического ускорителя Р-7М нейтронов в программном комплексе RHITS была построена модель 4-го канала циклического ускорителя Р-7М, в которой учитывались все конструкционные материалы, для проведения нейтронно-физических расчетов методом Монте-Карло [6]. На рисунке 4 представлено сечение построенной модели экспериментального канала. Модель представляет из себя набор конструкционных материалов, состоящих из бериллиевой мишени, бетонного кольца с внутренними вставками из стальных дисков и полиэтилена. В центре конструкционных материалов расположен канал для формирования нейтронного потока. Источник нейтронов расположен в месте с координатой по оси $Z=4,5$ см. Расчетная область расположена в месте с координатой по оси $Z=110,7$ см.

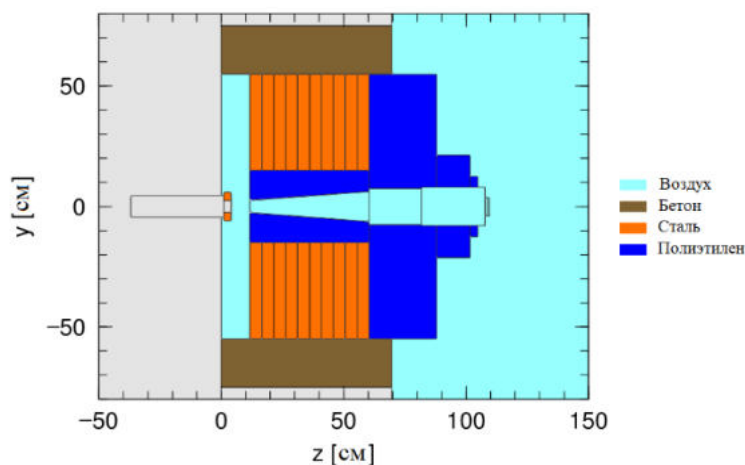


Рисунок 4 – Сечение расчетной модели экспериментального канала

На рисунке 5 представлено пространственное распределение нейтронов в 4-ом канале циклического ускорителя Р-7М.

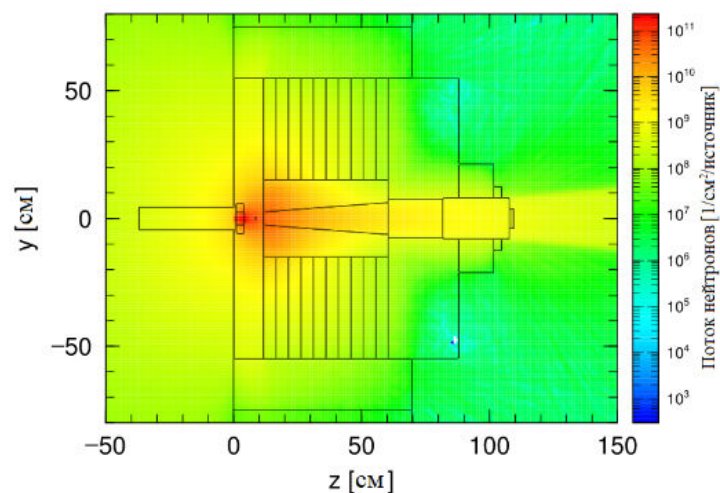


Рисунок 5 – Пространственное распределение нейтронов

Помимо пространственных распределений рассчитано энергетическое распределение плотности потока нейтронов на расстоянии 100 см от мишени, представленные на рисунке 6.

На расстоянии 100 см от мишени средняя энергия нейтронов составила 7,1 МэВ, а наиболее вероятная энергия составила равной 5,4 МэВ. Суммарная плотность потока нейтронов всех энергий составила $1.21 \cdot 10^8$ нейтрон·см⁻²с⁻¹.

Помимо энергетических и пространственных характеристик, было проведено определение углового распределения нейтронов, испускаемых из Ве-мишени в 4-м канале циклического ускорителя Р-7М, представленное на рисунке 7. Данное угловое распределение нейтронов определяет, как излучение распространяется в окружающей среде и взаимодействует с ней. Этот аспект является важным фактором при исследовании нейтронно-физических характеристик 4-го канала циклического ускорителя.

Из рисунка 7 видно, что 66 % всех нейтронов на срезе экспериментального канала после коллиматора распространяются в секторе ± 20 градуса.

Заключение. В ходе выполнения работы была создана расчетная модель 4-го экспериментального канала ускорителя Р-7М. Произведен расчет пространственного, энергетического и углового распределения потока нейтронов в 4-ом экспериментальном канале циклического ускорителя Р-7М. На расстоянии 100 см от мишени средняя энергия нейтронов составила 7,1 МэВ, а наиболее вероятная энергия составила равной 5,4 МэВ. Суммарная плотность потока нейтронов всех энергий составила $1.21 \cdot 10^8$ нейтрон·см⁻²с⁻¹. Установлено, что имеет место анизотропия рассеяния плотности потока нейтронного излучения, так как 66 % нейтронов излучается в секторе ± 20 градусов.

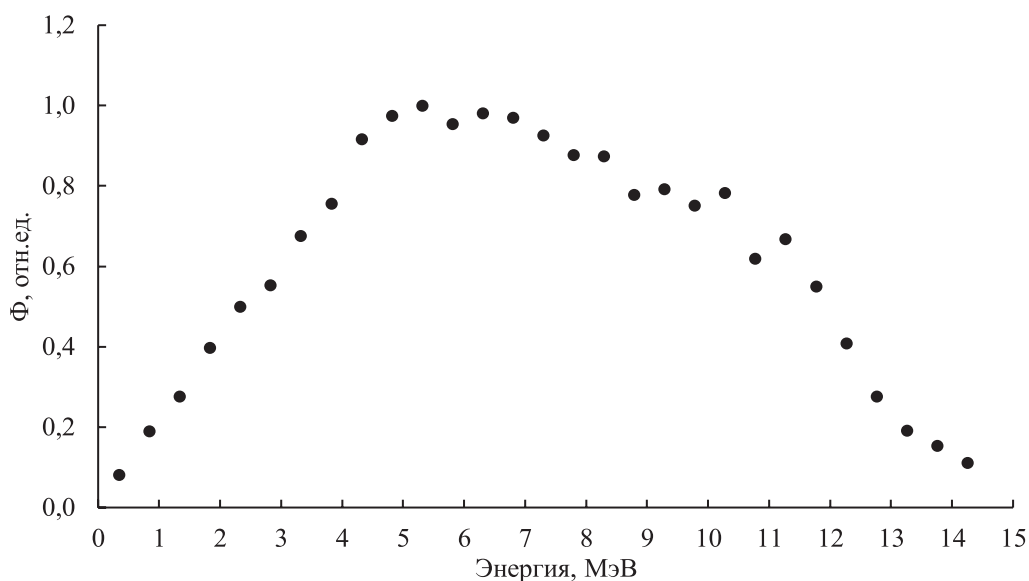


Рисунок 6 – Энергетическое распределение потока нейтронов на срезе экспериментального канала

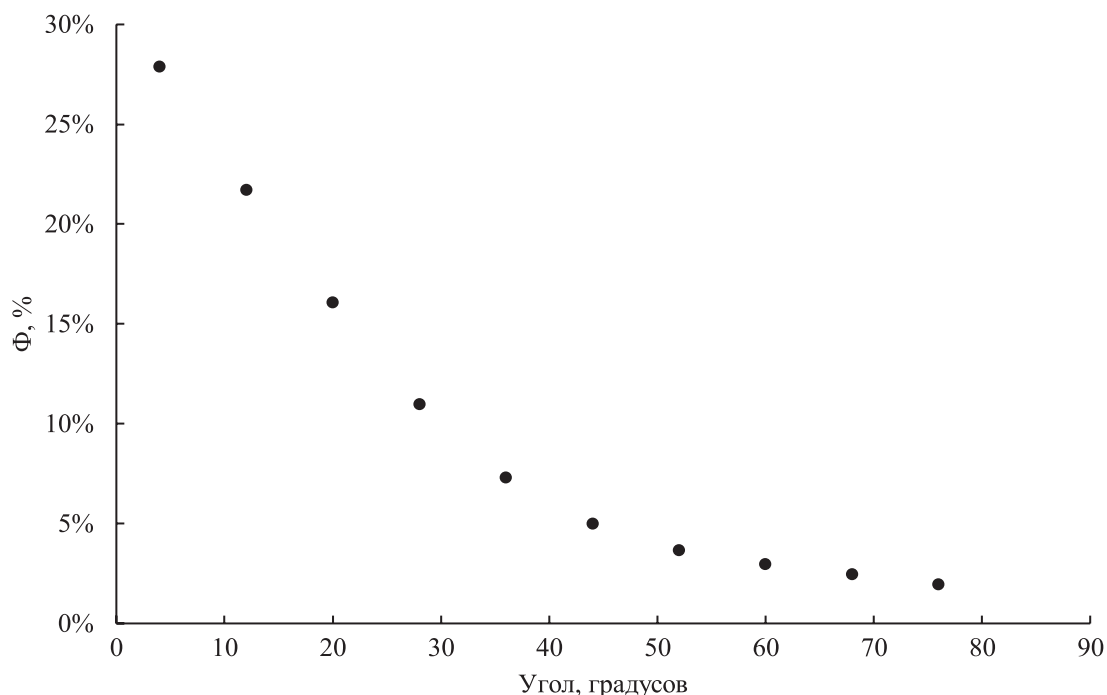


Рисунок 7 – Угловое распределение потока нейтронов на срезе экспериментального канала

ЛИТЕРАТУРА

1. Корпоративный портал ТПУ – История лаборатории [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.tpu.ru/departments/laboratory/lprv/history>).
2. Зырянов Б.Н., Мусабаева Л.И., Летов В.Н., Лисин В.А. Дистанционная нейтронная терапия. – М.: ТГУ, 1990. – 300 с.
3. Weaver, K. A. Neutrons from deuteron bombardment of light nuclei: Thesis Submitted in Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy / Weaver K. A.; University of California. – Livermore, 1972.
4. Weaver K. A. [и др.]. Neutron Spectra from Deuteron Bombardment of D, Li, Be, and C // Nuclear Science and Engineering. 1973. № 1 (52). С. 35–45.
5. Гладких М. В., Смольников Н. В., Овсенёв А. Е., Аникин М. Н., Наймушин А. Г., Лебедев И. И., Ломов И. В. Составной источник для моделирования столкновительных реакций на базе циклического ускорителя Р-7М // Вестник Башкирского университета. - 2023 - Т. 28 - № 4. - С. 349-354.
6. Sato T. [и др.]. Recent Improvements of Particle and Heavy Ion Transport code System: PHITS // EPJ Web of Conferences. 2017. (153). С. 06008.