

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВСТАВКИ-ФИЛЬТРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ НА ЦИКЛИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ Р7-М

А.Е. Овсенёв, М.В. Гладких, Н.В. Смольников, М.Н. Аникин,
И.И. Лебедев, А.Г. Наймушин

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия,
aeo3@tpu.ru, mvg23@tpu.ru, nvs38@tpu.ru, amn@tpu.ru, iil@tpu.ru, agn@tpu.ru*

Источники нейтронов для медицинских применений эволюционировали от громоздких ядерных реакторов к компактным ускорительным системам, что стало возможным благодаря развитию ядерной физики и инженерии. Исторически реакторы были первыми источниками нейтронов для БНЗТ. Например, реактор FIR1 в Финляндии использовался для лечения сарком до его закрытия в 2023 году. В Японии реакторы JRR-4 и KUR десятилетиями служили платформой для клинических исследований. Однако их эксплуатация связана с высокими затратами, радиационными рисками и необходимостью строгого регулирования. Сегодня лишь единицы реакторов, такие как модернизированный KURRI в Киото, остаются в строю, комбинируя БНЗТ с протонной терапией для повышения эффективности.

Бор-нейтронзахватную (БНЗТ), гадолиний-нейтронзахватную (ГНЗТ) терапию, нейтронная терапия, включая терапию быстрыми нейтронами остается одним из ключевых методов лечения агрессивных и радиорезистентных опухолей, таких как глиобластома, меланома и саркомы. За последние десятилетия технологии генерации нейтронов, моделирование их взаимодействия с биологическими мишенями и разработка новых фармакологических агентов совершили значительный прорыв. Однако внедрение этих методов в клиническую практику сталкивается с техническими, экономическими и регуляторными вызовами.

Ключевые слова: циклический ускоритель Р7-М; нейтрон-захватная терапия; поток нейтронов, Ве-мишень.

COMPUTATIONAL DETERMINATION OF FILTER INSERT MATERIALS FOR CONDUCTING NEUTRON CAPTURE THERAPY ON A CYCLIC ACCELERATOR R7-M

Aleksandr Ovsenev, Mikhail Gladkikh, Nikita Smolnikov,
Mikhail Anikin, Ivan Lebedev, Artem Naymushin
National Research Tomsk Polytechnic University,

*30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia,
aeo3@tpu.ru, mvg23@tpu.ru, nvs38@tpu.ru, amn@tpu.ru, iil@tpu.ru, agn@tpu.ru*

Neutron sources for medical applications have evolved from bulky nuclear reactors to compact accelerator systems, made possible by the development of nuclear physics and engineering. Historically, reactors were the first sources of neutrons for BNRT. For example, the FIR1 reactor in Finland was used to treat sarcomas until its closure in 2023. In Japan, the JRR-4 and KUR reactors have served as a platform for clinical research for decades. However, their operation is associated with high costs, radiation risks and the need for strict regulation. Today, only a few reactors, such as the upgraded KURRI in Kyoto, remain operational, combining BNRT with proton therapy to increase efficiency. Boron neutron capture (BNRT), gadolinium neutron capture (GNRT) therapy, neutron therapy, including fast neutron therapy, remains one of the key treatment methods for aggressive and radioresistant tumors such as glioblastoma, melanoma, and sarcomas. In recent decades, neutron generation technologies, modeling of their interaction with biological targets and the development of new pharmacological agents have made significant breakthroughs. However, the introduction of these methods into clinical practice faces technical, economic, and regulatory challenges.

Now, the R-7M cyclotron is operating and actively used at TPU. However, the problem of the lack of both a universal model of the neutron source and a full-fledged model of experimental channels is particularly acute, because the accelerator is used for neutron therapy purposes. The identification of patterns of neutron radiation beam formation and the further construction of a source model based on these patterns would significantly simplify and speed up the work related to the assessment of dose loads on the patient.

Keywords: cyclic accelerator P7-M; neutron capture therapy; neutron flux; Be-target.

Введение

В настоящее время онкологические заболевания занимают одно из ведущих мест среди причин преждевременной смерти людей. Так, в 2023 году онкологические заболевания стали причиной каждой шестой смерти в России [1]. И в связи с дальнейшим ухудшением экологической обстановки число онкологических заболеваний будет только расти. Поэтому разработка и внедрение новых перспективных технологических методов лечения злокачественных новообразований продолжается.

Одним из перспективных методов лечения онкологических заболеваний является бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ). БНЗТ является одним из методов лучевой терапии для лечения злокачественных новообразований. Метод основан на ядерной реакции захвата нейтронного излучения сильно поглощающими изотопами (B^{10} , Gd^{157}) [2].

Наиболее функциональным в качестве источника нейтронов является использование ускорителя за счет возможности реализации установок с заданными свойствами на базе экспериментальных ускорительных устройств, а также снижения дозовых нагрузок на здоровые ткани от гамма-излучения при терапии.

В ТПУ в качестве установки для БНЗТ может использоваться циклотрон Р-7М. Основными преимуществами циклотрона Р-7М являются возможность ускорения ионов в широком диапазоне масс.

Материалы и методы исследования

Для определения параметров источника нейтронов сформирована модель бериллиевой мишени. Формирование модели проведено в программе RHITS, которая осуществляет моделирование переноса излучения методом Монте-Карло [3].

Модель циклического ускорителя в программе RHITS представляет из себя набор конструкционных материалов, которые полностью идентичны реальному циклотрону.

Для формирования потока эпитепловых

нейтронов в экспериментальном канале циклического ускорителя Р7-М необходимо использовать специальный фильтр, состоящий из материалов с высокой замедляющей способностью и низким сечением поглощения нейтронов, такие как: Pb, W, Bi, AlF_3 , D_2O , CaF_2 , MgF_2 [4].

При моделировании фильтра в экспериментальном канале циклического ускорителя Р7-М использовались как чистые материалы, такие как Pb, Bi, W, так и различные комбинации материалов: Pb-W- D_2O и Pb-Bi- D_2O .

В ходе расчетов был определена наиболее оптимальная комбинация толщин различных материалов, для формирования потока эпитепловых нейтронов для БНЗТ [5]. Толщины составили: 17 см для первого материала, 10 см для второго и 16 для третьего.

Фильтрующая вставка была размещена на расстоянии 7 мм от Ве-мишени. Графики распределения плотности потока быстрых, эпитепловых и тепловых нейтронов по длине экспериментального канала для мономатериальных вставок указан на рисунках 1 и 2.

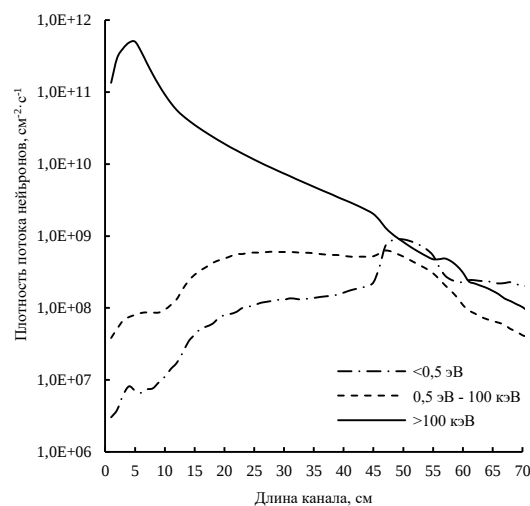


Рис. 1. Распределение плотности потока нейтронов различной энергии по длине экспериментального канала со вставкой из Pb

Графики распределения плотности потока эпитепловых нейтронов по длине экспериментального канала для комбинаций материалов вставок указаны на рисунке 3.

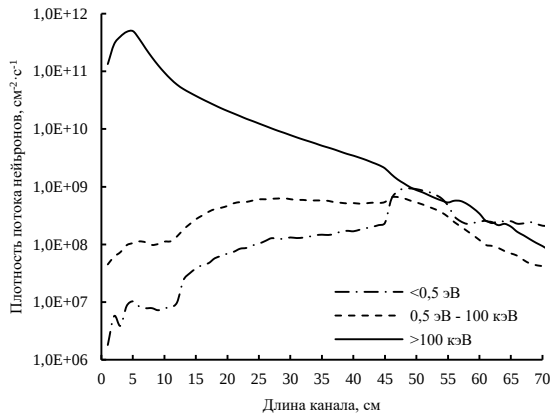


Рис. 2. Распределение плотности потока нейтронов различной энергии по длине экспериментального канала со вставкой из Bi

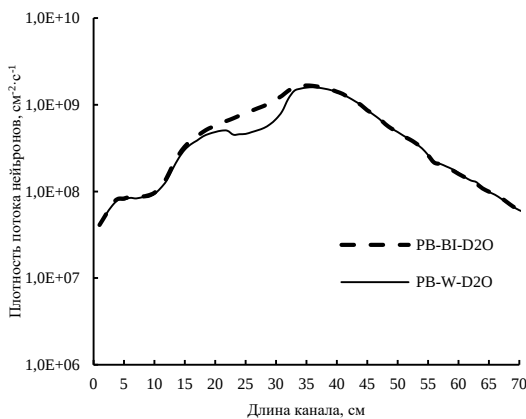


Рис. 3. Распределение плотности потока эпитепловых нейтронов по длине экспериментального канала при двух вариантах комбинаций вставки

На основании рисунка 3 можно заметить, что в материалах фильтра происходит увеличение плотности потока эпитепловых нейтронов. Полученные данные приближены к условиям, необходимым для проведения БНЗТ. Наиболее перспективной видится использование комбинации материалов Pb-Bi-D₂O, как наиболее подходящие материалы по расчету.

Заключение

На данный момент циклотрон Р7-М генерирует потоки быстрых нейтронов. На основании построенной модели производились расчеты с различными комбинациями материалов для получения требуемых характеристик потока эпитепловых нейтронов. На данном этапе исследования наиболее подходящей комбинацией является сочетание материалов: Pb, Bi, D₂O. В дальнейшем планируется физическая реализация фильтрующей вставки, состоящей из определенной комбинации материалов. После реализации планируется проведение ряда экспериментов для подтверждения полученных расчетных данных.

Библиографические ссылки

1. Каприн А.Д., и др. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность), 2024. 252 с.
2. Sauerwein W.A.G., et al. (ed.). Neutron capture therapy: principles and applications. Springer Science & Business Media, 2012.
3. Sato T., et al. Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology* 2018; 55(6): 684-690.
4. Tanaka H., et al. Characteristic evaluation of the thermal neutron irradiation field using a 30 MeV cyclotron accelerator for basic research on neutron capture therapy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 2020; 983: 164533.
5. Sauerwein W.A.G., et al. Requirement for boron neutron capture therapy (BNCT) at a nuclear research reactor. The European BNCT Project, Belanda. 2009.