

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the left.

Шихада Абдуллах

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА
ОСНОВЕ ЦИКЛОТРОНА ДЛЯ ЛУЧЕВОЙ РАДИОТЕРАПИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Кривобоков Валерий Павлович

доктор физико-математических наук, профессор, руководитель Научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга Инженерной школы ядерных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Официальные оппоненты:

Лисин Валерий Андреевич

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института онкологии федерального государственного бюджетного научного учреждения «Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук»

Михайлов Михаил Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией радиационного и космического материаловедения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита состоится «27» декабря 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета (ДС.ТПУ.01) Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru.

Автореферат разослан «_____» октября 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.01
кандидат физико-математических наук



Кашкаров Е. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертации. В радиотерапии обычно используются нейтроны с энергией в интервале от 1 до 50 МэВ, которые генерируются в результате взаимодействия ускоренных протонов или дейтронов с лёгкой, чаще всего бериллиевой, мишенью. В качестве их источника обычно используют циклотроны или другие подобные ускорители заряженных частиц.

Пространственное распределение таких нейтронов близко к сферически симметричному. Их потоки в медицинской практике коллимируются подобно фотонам в фотонной терапии, генерируемым с помощью линейных ускорителей электронов. Нейтроны деления в ядерных реакторах с энергией в диапазоне от 0,5 до 10 МэВ тоже могут быть использованы в медицинской практике. Как нейтральные частицы, они взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов в тканях, производя протоны, ядра отдачи и, изредка, осколки деления, которые при торможении создают плотные цепочки столкновений.

Для нейтронов, применяемых в терапии, характерно, что около 85% всего энергосодержания при их взаимодействии с тканями происходит в результате рассеяния на ядрах водорода. Это означает, что выделение кинетической энергии частиц в веществе (керма) будет больше в ткани с высоким содержанием водорода.

Линейная потеря энергии при торможении протонов, созданных в результате реакции (n, p), лежит в диапазоне от 20 до 100 кэВ/мкм. Это существенно больше, чем у мегаэлектронвольтных фотонов и электронов, используемых в обычной лучевой терапии (соответственно от 0,2 до 2 кэВ/мкм).

Здесь важно подчеркнуть, что именно это, более высокое энергосодержание, связанное со вторичными частицами, приводит к различным радиобиологическим эффектам, которые могут быть выгодными в определенных клинических ситуациях. В отличие от фотонов более высокая относительная биологическая эффективность (ОБЭ) часто объясняет различные клинические реакции, наблюдаемые при использовании нейтронов.

Высокоинтенсивные нейтронные пучки могут найти широкое применение во многих отраслях. В здравоохранении их можно использовать в лучевой терапии. Если эти нейтроны замедлить до тепловых или эпитепловых скоростей, они применимы в бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ). Она основана на реакциях поглощения их ядрами, когда ^{10}B облучают тепловыми нейтронами с образованием альфа-частицы (^4He) и ядра ^7Li . Разрушительное воздействие этих частиц ограничено размерами клеток, содержащими бор. Поскольку обе частицы имеют пробег, сопоставимый с размером клетки, они могут вызывать избирательную гибель опухолевых клеток без значительного повреждения окружающих нормальных тканей.

Поэтому успех медицинского применения лучевой терапии на быстрых нейтронах во многом зависит от того, насколько совершенны их источники, используемые в клинической практике. Несмотря на очевидную важность их создания, многие аспекты этого вопроса развиты пока недостаточно.

Степень разработанности темы. Терапия быстрыми нейтронами более эффективна, чем фотонами и электронами, но у нее есть проблема отсутствия пика Брэгга. Из-за этого координаты области поглощения радиационного поля,

обусловленного нейтронами, могут не соответствовать местоположению проблемных тканей.

Поскольку нейтроны не имеют заряда, их труднее собрать в узкие пучки, как в случае ионов или электронов. В данной работе мы существенно улучшили форму пучка и спектр нейтронов для их использования в лучевой терапии и других приложениях.

Целью настоящей диссертационной работы является создание высокоинтенсивных источников быстрых нейтронов на основе циклотрона У-120 Томского политехнического университета для применения в медицине и других областях. Ниже будет показано, что улучшение характеристик источника нейтронов может быть достигнуто путем оптимального выбора геометрии коллиматора пучка и свойств мишени. Изменяя их, можно в несколько раз увеличить поток нейтронов и существенно улучшить спектр. В итоге это позволяет повысить качество и сократить продолжительность лечения пациентов.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи.

1. Найти условия для осуществления ядерных реакций в мишенях с наибольшим выходом нейтронов.

2. Исследовать выход нейтронов из мишени, выполненной в виде спрессованного бериллиевого порошка, и облучаемой ускоренными лёгкими ионами.

3. Проанализировать известные базы данных по этой тематике, сопоставить их с полученными экспериментальными данными, и выполнить аппроксимацию результатов измерения плотности потока и средней энергии нейтронов для оперативной оценки их транспортных и дозовых характеристик.

4. Выполнить цифровое моделирование процессов образования и выхода нейтронного пучка. Доказать применимость этой методики для оптимизационных расчётов материальных и геометрических параметров коллиматоров.

5. Разработать и изготовить опытные образцы нейтронных коллиматоров. Исследовать их функциональные характеристики.

Научная новизна исследования подтверждается следующими работами и результатами, соответственно выполненными и полученными впервые.

1. Изучена эмиссия нейтронов и функциональные свойства мишени из спрессованного бериллиевого порошка.

2. Проведено систематическое исследование влияния материальных и геометрических параметров нейтронного коллиматора на его функциональные характеристики для получения узкого (диаметром не более 2 см) пучка нейтронов с целью более точной локализации и уменьшения облучения здоровых тканей в процессе лечения.

3. Предложены работоспособные выражения для расчёта плотности потока и средней энергии нейтронов в широком интервале энергий дейтронов (от 0,5 до 50 МэВ) для оперативной оценки их транспортных и дозовых характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Выполненные расчёты показали принципиальную возможность существенного (в несколько раз) повышения плотности потока нейтронов при оптимальном выборе геометрии и материалов нейтронного коллиматора. Это актуально для лучевой терапии,

так как таким путём можно сократить продолжительность процедуры облучения пациента и снизить радиационную нагрузку на него.

2. Полученные результаты дают возможность генерировать узкий пучок нейтронов, что позволяет обеспечить лечение малых по размерам опухолей и минимизировать облучение здоровых тканей.

3. Предложенная методика управления пучком может быть распространена на облучательные каналы ядерных реакторов, где плотность потока быстрых нейтронов обычно значительно больше.

4. Результаты, полученные при изучении транспортных характеристик быстрых нейтронов в канале коллиматора, имеют большое значение для разработки высокоинтенсивных источников этих частиц.

Объекты и методы исследований. Характеристики нейтронов вычислены с помощью компьютерных программ, доступных в открытых источниках. В частности, процесс переноса моделировался с помощью кода MCNP. Код RHITS использовался для расчета потока нейтронов в зависимости от типа мишени, тока и энергии ускоренных ионов. Вся работа проводилась на базе циклотрона У-120 Томского политехнического университета. В процессе экспериментов использовались пучки дейтронов с энергией 13,6 МэВ, литые и спрессованные из порошка бериллиевые мишени.

Метод активации взят за основу для определения потока нейтронов с помощью железной и алюминиевой фольг в качестве детекторов быстрых нейтронов в диапазоне 1-14 МэВ. Радиоактивность образцов измерялась методом гамма-спектроскопии с помощью детектора HPGe. Программа PACE4 (LISE++) применялась для прогнозирования спектров нейтронов, получаемых в результате реакции ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование спрессованного порошка бериллия на медной подложке в качестве мишени приводит к экспериментально наблюдаемому увеличению плотности потока быстрых нейтронов в 1,6 раза по сравнению с мишенью из чистого литого бериллия.

2. Замена бериллия на литий в мишени позволяет увеличить выход нейтронов в 2,5 раза. Максимальный выход нейтронов имеет место в случае дейтронов с энергией 12 МэВ (принято за 100%). Для протонов и альфа-частиц он существенно меньше (22 и 2,4 % соответственно).

3. Оптимизация по предложенной методике материальных и геометрических параметров большого коллиматора в лечебном кабинете циклотронной лаборатории позволяет в 2-3 раза увеличить плотность потока нейтронов, генерируемых бериллиевой мишенью.

4. Коллиматор с коническим проходным отверстием диаметром 106 мм на входе и 20 мм на выходе позволяет значительно (в 14,1 раза) увеличить плотность потока быстрых нейтронов по сравнению с цилиндрическим каналом.

Личный вклад автора. Автор принял активное участие в постановке задачи диссертационного исследования. Им были выполнены все расчёты, связанные с моделированием генерации и транспортировки нейтронов с использованием кодов MCNP и RHITS, а также с оптимизацией материальных и геометрических параметров

коллиматоров. Подготовка экспериментов и их проведение выполнены коллективом циклотронной лаборатории, в составе которого работал автор. Все измерения, обработка результатов и их анализ были выполнены автором лично или с его непосредственным участием.

Степень достоверности результатов. Корректность теоретических и экспериментальных данных, представленных в диссертации, подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, повторяемостью опытов при идентичных начальных значениях параметров, а также сравнением теоретических результатов с данными других авторов, представленными в научной печати.

Достоверность полученных результатов подтверждается и тем, что они носят непротиворечивый характер, взаимно дополняют друг друга и соответствуют современным представлениям о механизмах рассматриваемых явлений.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде семинаров и конференций, в частности: на II Международном форуме онкологии и радиологии Минздрава России, Москва, 2019 г.; на XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2019 г.; на IX и X Международных научно-практических конференциях «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине», Томск, 2019, 2020 гг.; на The 14th International Forum on Strategic Technology, IFOST, Томск, 2019 г., на научных семинарах НОЦ Б.П. Вейнберга Инженерной школы ядерных технологий ТПУ.

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в виде 8 печатных работ, в том числе двух – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и шести – в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 115 наименований. Работа содержит 118 страницы, включает 14 таблиц и 56 рисунка.

Основное содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы задачи исследований, отражены практическое значение, научная новизна полученных результатов и выводов, личный вклад автора.

В первой главе представлен краткий обзор терапии онкологических заболеваний быстрыми нейтронами. Перечислены биологические и радиологические причины, по которым лучевая терапия с использованием пучка нейтронов предпочтительнее по сравнению с фотонами и электронами. Отражены механизмы взаимодействия нейтронов с тканями и их особенности.

Перечислены наиболее важные ядерные реакции, которые приводят к образованию быстрых нейтронов. Большинство источников предполагают использование пучков ускоренных дейтронов, которые сталкиваются с бериллиевой мишенью. Полученные при этом быстрые частицы затем собираются с помощью коллиматора, который направляет пучок в кабинет лучевой терапии или для других целей. Предыдущие

исследования показали, что поток быстрых нейтронов может быть увеличен путем улучшения конструкции коллиматора.

Но со временем интерес к терапии быстрыми нейтронами снизился, и основное внимание было направлено на использование тепловых нейтронов по методу БНЗТ. Он требует мощных источников тепловых нейтронов, например, ядерных реакторов, и это ограничивает его распространение.

Остаётся актуальной терапия протонами и ионами с энергиями выше 150 МэВ. Для этого требуются ускорители со специальными магнитами, но эти установки слишком дороги по сравнению с источниками нейтронов.

Поэтому целесообразно ориентироваться на терапию быстрыми нейтронами. Но для этого надо увеличить плотность их потока путём использования новых мишеней, а также оптимального выбора материальных и геометрических параметров нейтронных коллиматоров.

Во второй главе дано описание экспериментальных исследований, выполненных в рамках данной диссертационной работы, схем установки, измерительных приборов, методики получения и обработки результатов.

Представлена процедура моделирования переноса нейтронов через коллимирующую систему, включая оптимизационные расчеты для получения максимального нейтронного потока с использованием кода MCNP, а также коды PHITS и LISE++. Они использовались для расчета нейтронного потока, возникающего в результате ядерных реакций.

Коллиматор, который был установлен для обработки больных быстрыми нейтронами в циклотронной лаборатории Томского политехнического университета, имеет длину 100 см от Be мишени до апертуры. Чтобы проводить эксперименты с изменяемыми материалами и геометрией, необходимо спроектировать и построить специальный коллиматор, удобный для этого.

Исходя из требований хорошего статистического обоснования результатов и минимизации стоимости работы было исследовано десять вариантов коллиматоров с использованием трех парафиновых элементов размером $25 \times 25 \times 17 \text{ см}^3$, имеющих разную геометрию (таблица 1 и рисунок 1). Кроме того, для улучшения рассеивающих характеристик и увеличения выхода быстрых нейтронов использовались металлические детали, в том числе плиты из железа и свинца, в частности, 4 плиты размером $25 \times 25 \text{ см}^2$, 4 плиты размером $25 \times 9 \text{ см}^2$ и 4 плиты размером $25 \times 5 \text{ см}^2$ (все толщиной 2 см для железа и 0,5 см для свинца).

Таким образом, при разработке очередного опытного коллиматора мы можем использовать любой набор материалов (железо, свинец, парафин и т.д.) и любые геометрические характеристики конструктивных элементов (рисунок 2).

Таблица 1. Три типа парафиновых элементов с размерами $25 \times 25 \times 17 \text{ см}^3$. Обозначения Кол. 1, Кол. 2 и Кол. 3 являются сокращениями названий коллиматоров соответственно 1,2,3 (см. рисунок 1).

Обозначение коллиматора	Внутренняя форма	Диаметр отверстия на входе, [см]	Диаметр отверстия на выходе, [см]	Коллимационная длина, [см]
Кол.1	цилиндр	7	7	17
Кол.2	конус	12	7	17
Кол.3	конус	10,5	2	17

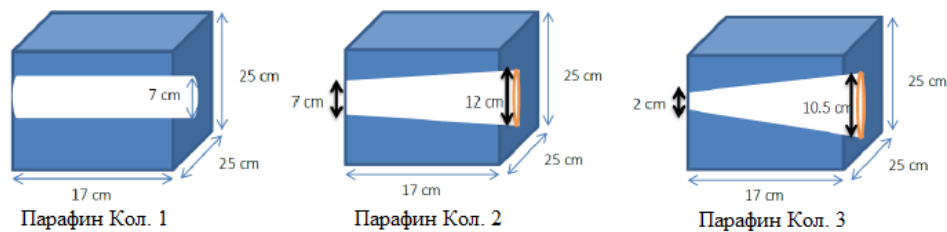


Рисунок 1. Профили отверстий парафиновых коллиматоров.

Такой коллиматор состоит из двух элементов, парафинового и железного. Парафиновый элемент имеет длину 17 см, железный - 25 см. Таким образом, полная длина коллиматора составляет 42 см при толщине стенки 4 см для железных и 1 см для свинцовых пластин.

В наших экспериментах использовалась мишень, которая представляла собой прессовку из порошка металлического бериллия толщиной около $0,3 \pm 0,02$ см, который был запрессован в медную форму диаметром 11,12 см и толщиной 0,485 см. Плотность бериллиевой мишени составляла примерно $1,2 \pm 0,2$ г см⁻³, в то время как литой металлический бериллий имеет плотность 1,85 г см⁻³. Бериллиевая мишень закреплялась на расстоянии 5 см от выхода канала ускорителя и 8 см от коллиматора. На выходном отверстии коллиматора закреплялись нейтронно-детекторные фольги из Cd, Cu, Al и Fe размерами $10 \times 10 \times 0,1$ мм³.

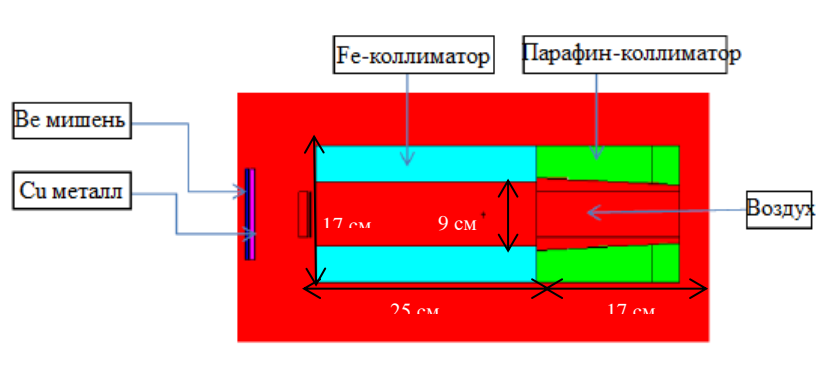


Рисунок 2. Схема коллиматора, состоящего из железного и парафинового элементов. Бериллиевая мишень помещена в медную форму.

Примечание: при изображении коллиматоров элементы бирюзового цвета выполнены из железа, зелёного цвета – из парафина или полиэтилена, коричневого цвета – из свинца; красная заливка означает, что это пространство занято воздухом.

Бериллиевая мишень облучалась дейтронами с энергией $E_d = 12,0$ МэВ в течение 10 минут при токе пучка ~ 2 мкА и диаметре пятна ~ 15 -20 мм. Энергетический спектр нейтронов, генерируемых в реакции ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ для дейтронов с такой энергией и углом выхода нейтронов 0° был смоделирован с помощью программы RACE 4. Он был использован во входном файле кода MCNP-4C, а затем скорректирован для максимального соответствия экспериментальным данным.

Эта процедура была применена для оценки спектра быстрых нейтронов, полученного при использовании мишени из спрессованного бериллиевого порошка. Это связано с тем, что спектр нейтронов, свойственный металлической бериллиевой мишени, хорошо известен по работам наших предшественников, а для порошковой мишени он ранее не изучался. Исследования показали, что максимальная интенсивность нейтронов приходится на энергию 4,5 МэВ, а их средняя энергия составляет 6-7 МэВ. Для измерения потока использовался нейтронно-активационный анализ с фольгами, содержащими изотопы ${}^{27}\text{Al}$ и ${}^{54}\text{Fe}$ в качестве детекторов нейтронов в этом диапазоне энергий.

Активность гамма-излучения измерялась коаксиальным германиевым детектором HPGe-GC1020. Плотность потока быстрых нейтронов была вычислена с использованием следующего выражения:

$$\phi \text{ (нейтрон см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) = \frac{A}{\langle \sigma \rangle N(1 - e^{-\lambda t_{irr}})e^{-\lambda t_c}}, \quad (1)$$

где A , λ , $\langle \sigma \rangle$, N , t_{irr} и t_c обозначают соответственно активность (Бк), постоянную распада (с^{-1}), эффективное сечение (см^2), количество ядер-мишеней, время облучения и время охлаждения.

Для измерения углового распределения быстрых нейтронов пять двойных детекторов Al и Fe были закреплены под пятью определенными углами (40, 20, 0, -20 и -40 градусов) относительно направления движения пучка дейтронов.

Угловое распределение нейтронов изучалось не только по углу рассеяния, но и по изменению нормали к мишени в зависимости от направления движения пучка дейтронов. Измерения проводились для четырех углов (0, 10, 30 и 50 градусов), где в случае 0 градусов нормаль к мишени совпадает с направлением движения пучка дейтронов. В качестве мишени используется спрессованный бериллиевый порошок, описанный ранее.

Железные и алюминиевые детекторы помещались в круглый пластиковый контейнер диаметром 20 и высотой 5 см, который располагался на расстоянии 6 см от окна канала циклотрона. Контейнер имеет отверстие диаметром 5 см для ввода пучка дейтронов, а бериллиевая мишень закреплялась в его середине, в 10 см от этого отверстия. Ускоренные дейтроны выходят из канала ускорителя, который заканчивается тонкой пленкой из сплава алюминия и бериллия толщиной около 40 мкм, отделяющую вакуумную среду ускорителя от наружной атмосферы.

Дейтроны внутри циклотрона У-120 ускоряются до энергии 13,6 МэВ, но затем постепенно теряют энергию, двигаясь через выводное окно канала ускорителя и слоя воздушной среды толщиной 16 см при атмосферном давлении до столкновения с бериллиевой мишенью. Средняя энергия дейтронов при попадании на поверхность бериллиевой мишени (с учетом всех предыдущих соображений) была вычислена по программе LISE++, версия 15.23.22 и оказалась равной 12,033 МэВ. Облучение проводилось в течение 10 минут с током пучка 5 мкА.

Для уменьшения энергии дейтронов использовались многослойные тонкие пленки из алюминиевой фольги толщиной 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 мм и размерами $5 \times 5 \text{ см}^2$, закрепленные на входном отверстии пластикового контейнера. Это позволяет управлять энергией дейтронов при исследовании её влияния на поток нейтронов.

В третьей главе изучено влияние типа мишени (Be, Li), состава пучка драйвера (дейтроны, протоны и альфа-частицы), их энергии (12, 18 и 25 МэВ) и т.д. на плотность потока нейтронов с использованием программы PHITS, которая описана в главе 2.

Экспериментально измерено угловое распределение нейтронов, инициированных в результате столкновения пучков дейтронов с энергией 12 МэВ с мишенью из прессованного порошка бериллия. Затем эти данные были сравнены с результатами других исследований, выполненных с использованием мишеней из литого (прокатанного) металлического бериллия.

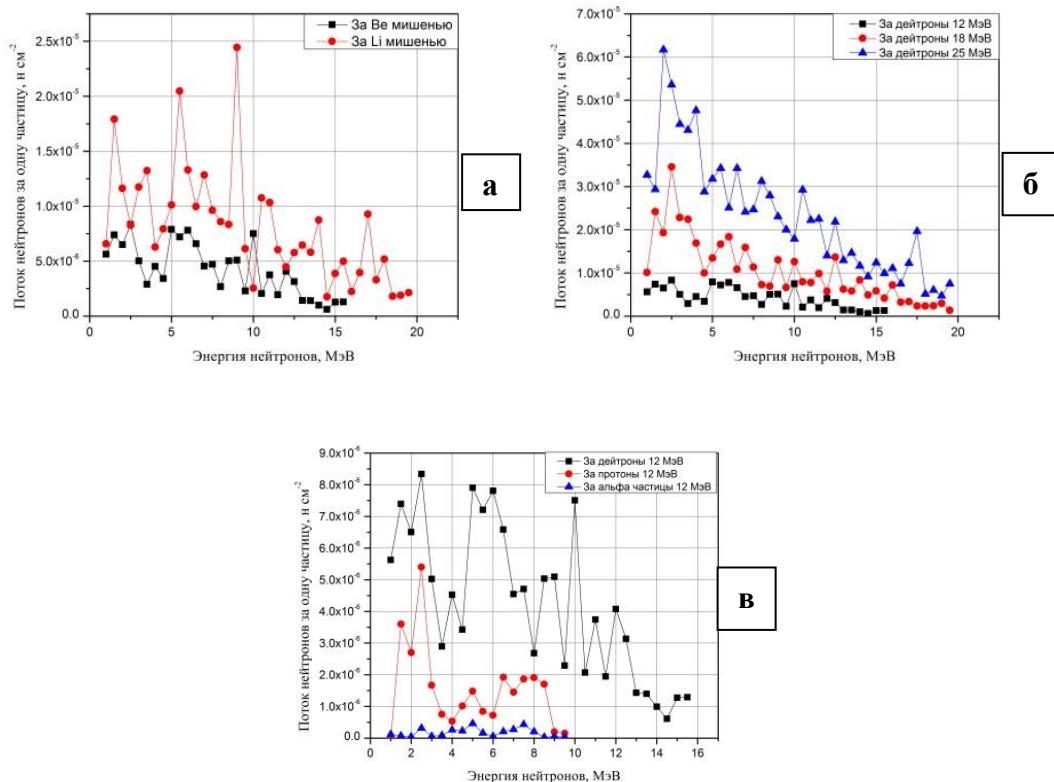


Рисунок 3. (а) - Поток нейтронов на одну частицу источника при бомбардировке мишени из бериллия и лития дейтронами с энергией 12 МэВ. (б) - Потоки нейтронов для дейтронов с энергиями 12, 18 и 25 МэВ при бомбардировке мишени из бериллия. (в) - Потоки нейтронов при бомбардировке бериллиевой мишени: дейтронами, протонами и альфа-частицами с энергией 12 МэВ.

Из рисунка 3(а) видно, что использование лития в качестве мишени может увеличить выход нейтронов в 2,4 раза при той же энергии пучка дейтронов. Бериллий и литий наиболее часто используются для получения быстрых нейтронов, но бериллиевая мишень более предпочтительна, поскольку обладает более высокой термостойкостью: ее температура плавления составляет 1287°C, в отличие от литиевой мишени (всего около 180°C).

Пучки дейтерия производят быстрые нейтроны с гораздо большим выходом, чем при использовании протонов (в 4,5 раза) или альфа-частиц (в 40 раз).

Важно измерить угловое распределение испускаемых нейтронов, что может помочь в оптимизации конструкции коллиматора, а также в целях защиты персонала от воздействия излучения.

На рисунке 4 представлено полярное угловое распределение нейтронов, зарегистрированных фольгами из алюминия и железа, расположенными в пяти симметричных угловых положениях: 0, 20, 40, -20 и -40 градусов для четырех углов направления движения пучка относительно мишени: 0, 10, 30 и 50 градусов (более подробная информация приведена в ссылке [1]).

Максимальная плотность потока нейтронов была при 0° (для Fe фольги) и составляла примерно 12×10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. В то же время максимальная плотность потока нейтронов при 0° (для Al фольги) была близка к 2×10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Таким образом, отношение потоков быстрых нейтронов в диапазоне энергий 1 – 14 МэВ и 6 – 14 МэВ составляет примерно 6:1. Как следствие, доминирующим компонентом в спектрах нейтронов является поток в области 1 – 6 МэВ, который составляет около 83% от общего потока быстрых нейтронов.

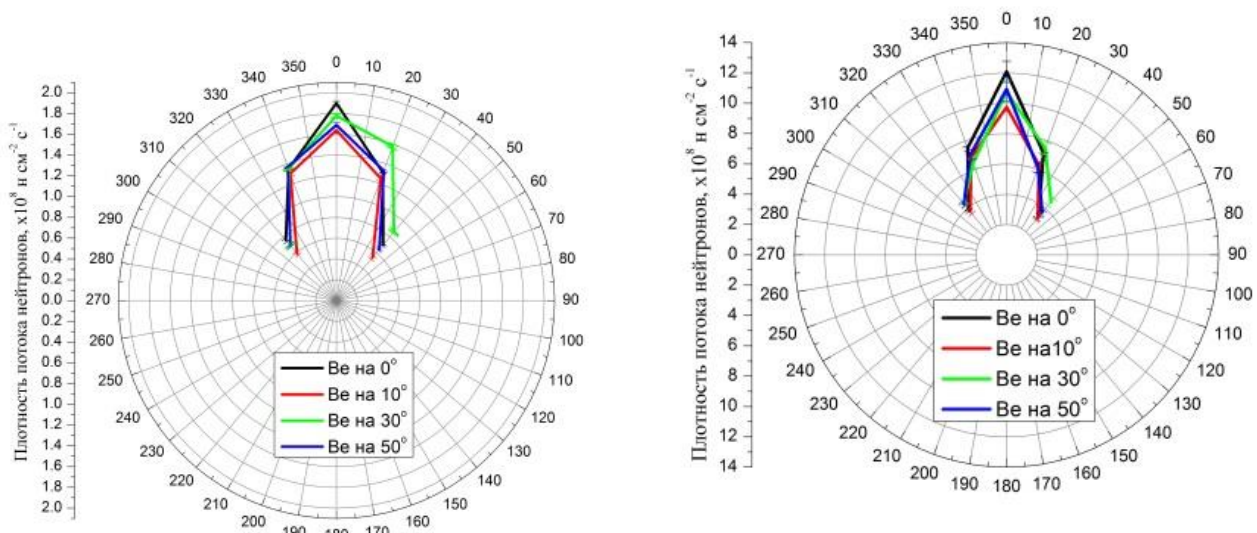


Рисунок 4. Полярные угловые распределения быстрых нейтронов, созданных путём воздействия дейтронов с энергией 12 МэВ на Ве мишень, в зависимости от угла между нормалью к мишени и направлением падающего пучка дейтронов. Результаты для детектора из Al (слева) и Fe фольги (справа).

Полученные потоки нейтронов сопоставлялись с потоками из предыдущей работы, выполненной с использованием цилиндрической литой бериллиевой мишени толщиной 2 мм и диаметром 5 см (см. Таблицу 2).

Таблица 2. Результаты измерения плотности потока нейтронов, полученные при облучении литой и прессованной бериллиевых мишеней дейтронами с энергией 12 МэВ (ток дейтронов 5 мкА, вплотную к мишени).

Состав детектора	Плотность потока нейтронов для мишени, прессованной из бериллиевого порошка, (10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$)	Плотность потока нейтронов для мишени, из литого бериллия (10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$)
Железная фольга	$84,60 \pm 1,10$	$52,9 \pm 2,5$
Алюминиевая фольга	$14,75 \pm 0,07$	$22,7 \pm 0,2$

Сравнивая наши результаты измерений потока нейтронов при 0° с результатами работы [2, 3], можно показать, что поток нейтронов, выходящий из литой бериллиевой мишени, достигает 9×10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, а из мишени из спрессованного порошка Ве он приближается к 12×10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ для пучка дейтронов с энергией 12 МэВ и током 5 мкА, на детекторе, расположенном в 10 см от мишени.

Из таблицы 2, сравнивая результаты углового распределения нейтронов нашего исследования и результаты работы [2], следует, что доля нейтронов с энергиями в интервале 1 – 6 МэВ составляет около 57%, а в интервале 6 – 14 МэВ - 43% для литой мишени. С другой стороны, согласно нашим результатам измерения потока нейтронов на мишени, спрессованной из Ве порошка, нейтроны в диапазоне энергий 1 – 6 МэВ составляют около 83% от общего потока, и с энергиями 6 – 14 МэВ - 17%.

Кроме того, плотность потока нейтронов при 0° из работ [2, 4] составляла приблизительно 6×10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, а из нашего исследования - около 12×10^8 нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Причина увеличения плотности потока связана с наличием медной формы, которая содержит спрессованный порошок бериллия. Медь может вносить свой вклад в общее количество нейтронов за счет реакции $\text{Cu}(n, 2n)$ и, таким образом, увеличивать их плотность потока.

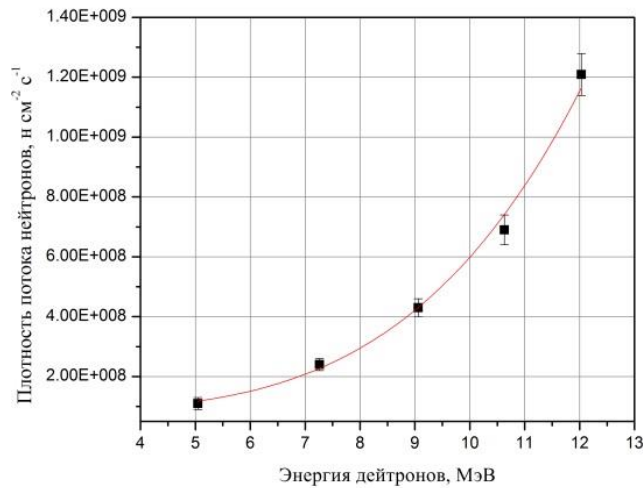


Рисунок 5. Экспериментальные данные (с погрешностей) и кривая наилучшего соответствия плотности потока быстрых нейтронов, испускаемых спрессованной мишенью Ве при 0° для различных энергий падающих дейтронов.

Наилучшее соответствие экспериментальных данных, представленных на рисунке 5, аналитическому выражению имеет место в том случае, если для аппроксимации использовать следующую формулу:

$$\phi (\text{нейтрон см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) = 4.97 \times 10^4 E_d^{4.0146} + 8.5 \times 10^7, \quad 5 \text{ MeV} \leq E_d \leq 15 \text{ MeV} \quad (2)$$

Рисунок 6 позволяет провести анализ качества наших экспериментальных результатов с использованием широкого набора литературных источников, в которых использовалась литая бериллиевая мишень и большой диапазон энергии дейтронов (от 0,5 до 50 МэВ).

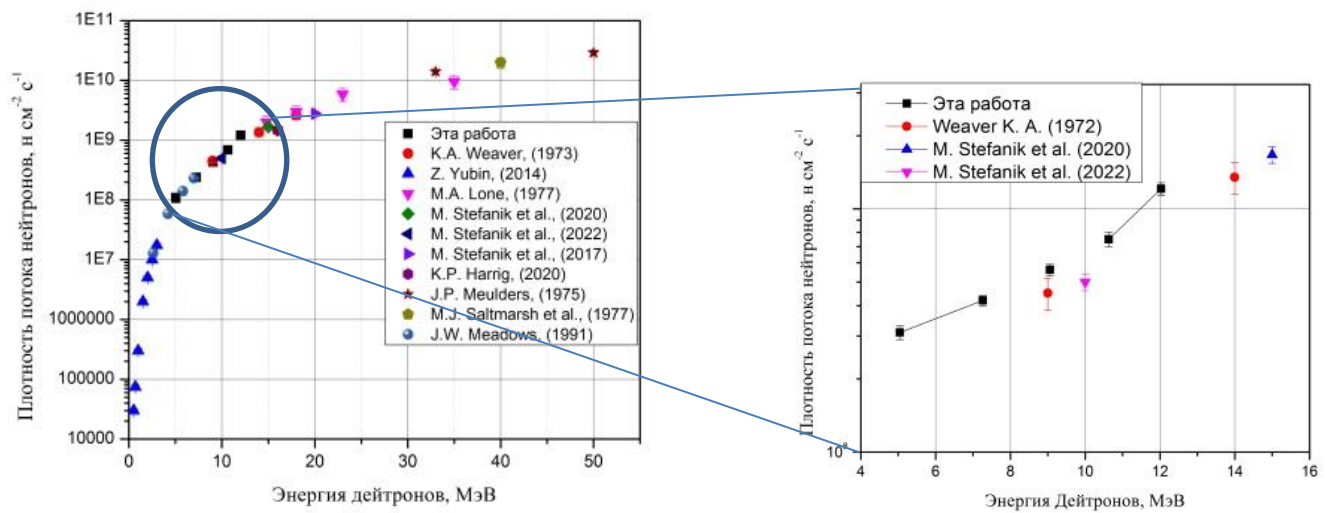


Рисунок 6. Сравнение выхода нейтронов между предыдущими литературными экспериментальными данными и данными этого исследования при 0° и расстоянии 10 см от Ве мишени до детекторов.

Было обнаружено из рисунка 6, что все экспериментальные точки, включая нашу, хорошо ложатся на кривую, без больших отклонений. Наилучшая аппроксимация ($R^2 = 0.98$) её имеет следующей вид:

$$\phi (\text{нейтрон } \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) = 2.088 \times 10^6 E_d^{2.4615}, \quad E_d \geq 3.5 \text{ MeV} \quad (3)$$

Поток нейтронов, полученный в наших экспериментах для энергии дейтронов 12 МэВ, был практически идентичен потоку по результатам [5], в которых энергия дейтронов составляла 14 МэВ. Кроме того, в опытах [6], где энергия дейтронов составляла 10,3 МэВ, поток нейтронов в нашем исследовании был примерно в 2,5 раза больше. Поток нейтронов увеличился примерно до 1,6 раза при использовании прессованного порошка Ве в качестве мишени по сравнению с литой мишенью. Мы предполагаем, что увеличение плотности потока нейтронов обусловлено реакцией $(n, 2n)$ на меди (наша спрессованная бериллиевая мишень была помещена в медную форму).

В процессе работы было замечено, что бериллиевая мишень, используемая в экспериментах, не нуждается в охлаждении, так как не повреждается в месте воздействия пучка. Возможно, что это связано с её малой плотностью и меньшими по сравнению с литой мишенью линейными потерями энергии налетающих дейтронов при их торможении. По крайней мере, в диапазоне плотности мощности пучка, использованного в данной работе.

В четвертой главе описаны лабораторные эксперименты и численное моделирование коллимирующих систем. Эти исследования были выполнены с целью увеличить плотность потока быстрых нейтронов путем оптимального выбора конструкции и материальных параметров изделий.

Оптимизированный коллиматор, представленный на рисунке 7б, утроил плотность потока быстрых нейтронов по сравнению с изделием, работающим в процедурной комнате циклотрона ТПУ (изображён на рисунке 7а).

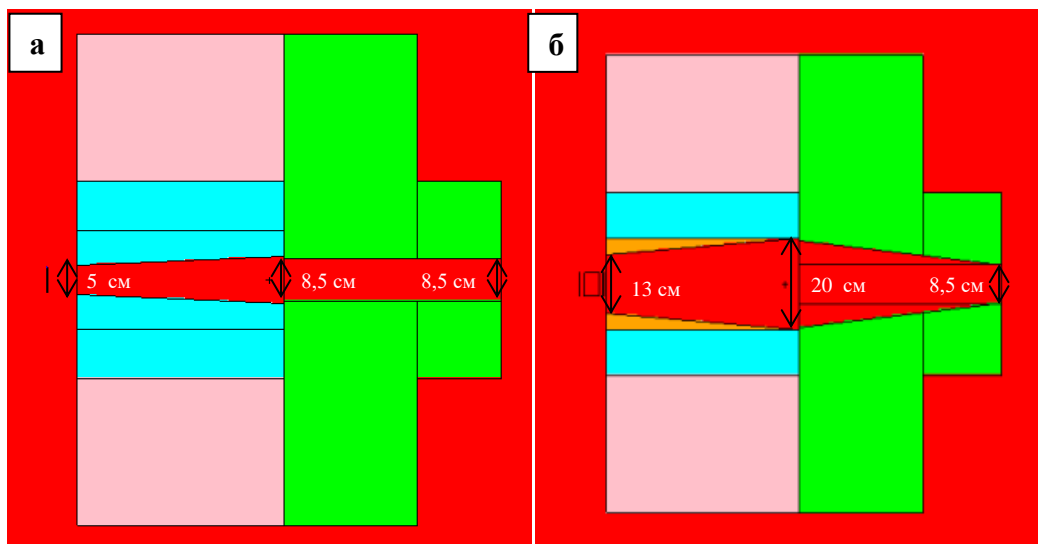


Рисунок 7. Профили коллиматоров: (а) - исходный; (б) - после оптимизации геометрии и состава материалов, выполненной с использованием кода MCNP.

Коллиматор, созданный ранее для лечебного кабинета в циклотронной лаборатории, содержит отверстие диаметром 5 см перед Ве мишенью, так как эта мишень имеет тот же диаметр. Он состоит из двух частей, первая из которых, ближайшая к мишени, представляет собой цилиндр из слоев железа диаметром от 5 до 8,5 см. Вторая - прямоугольный полиэтиленовый канал с постоянным сечением размером 8,5 x 8,5 см².

Результаты моделирования коллиматоров с различными геометриями и материалами внутренней структуры показали, что максимальный поток нейтронов имеет место в случае, если диаметр отверстия равен 13 см. Он позволяет увеличить плотность потока нейтронов в 3 раза.

Оптимальные параметры коллиматора (когда он даёт максимальную плотность потока), найденные с помощью моделирования, имеют место, если этот элемент содержит слой свинца, уменьшающийся по толщине с 3,5 см до нуля (на рисунке 7 выделено коричневым цветом). Кроме того, в выходной части (справа) он имеет коническую форму с диаметром 20 см на входе и 8,5 см на выходе.

Эта геометрия, оптимальная для нас, была найдена после более чем ста итераций.

Плотность потока нейтронов в коллиматоре первоначальной конструкции для дейтронов с энергией 13,6 МэВ при токе 30 мкА оказалась равной 1×10^8 нейтрон см⁻² с⁻¹, а мощность дозы составила 0,15 Гр/мин. В коллиматоре с оптимизированными параметрами она достигла значения 3×10^8 нейтрон см⁻² с⁻¹ и мощности дозы 0,45 Гр/мин. Это увеличение в 3 раза наблюдается в случае использования более широкого отверстия во входной части коллиматора (13 см) и в выходной (20 см), что позволило собрать больше нейтронов за счет упругого рассеяния.

Вторая причина роста плотности потока связана с наличием внутреннего слоя свинца, который играл две роли: первая заключалась в сборе большего количества нейтронов за счет упругого рассеяния, а вторая - в генерации новых нейтронов в результате реакции (n, 2n).

Полученный спектр нейтронов при использовании оптимизированной конструкции коллиматора показал увеличение плотности потока тепловых нейтронов в 5 раз, чем при использовании неоптимизированного коллиматора. Но поток тепловых нейтронов можно уменьшить, вставив пластину из свинца толщиной 3 см перед бериллиевой мишенью в качестве фильтра.

Следующая актуальная задача – получение узких пучков быстрых нейтронов. Они важны для более точного прицеливания при лечении рака и сохранения здоровых тканей. Моделирование было проведено с использованием кода MCNP для поиска оптимальной внутренней геометрии коллиматора и получения высокоинтенсивного и узкого пучка нейтронов.

Задача этих вычислений состоит в том, чтобы получить оптимальную геометрию полиэтиленовой детали для получения узкого пучка (2 см в диаметре) с максимально возможным потоком нейтронов.

Установлено, что оптимальный узкий полиэтиленовый коллиматор имеет диаметр 10,6 см в начале и заканчивается узким отверстием диаметром 2 см, как показано на рисунке 8б.

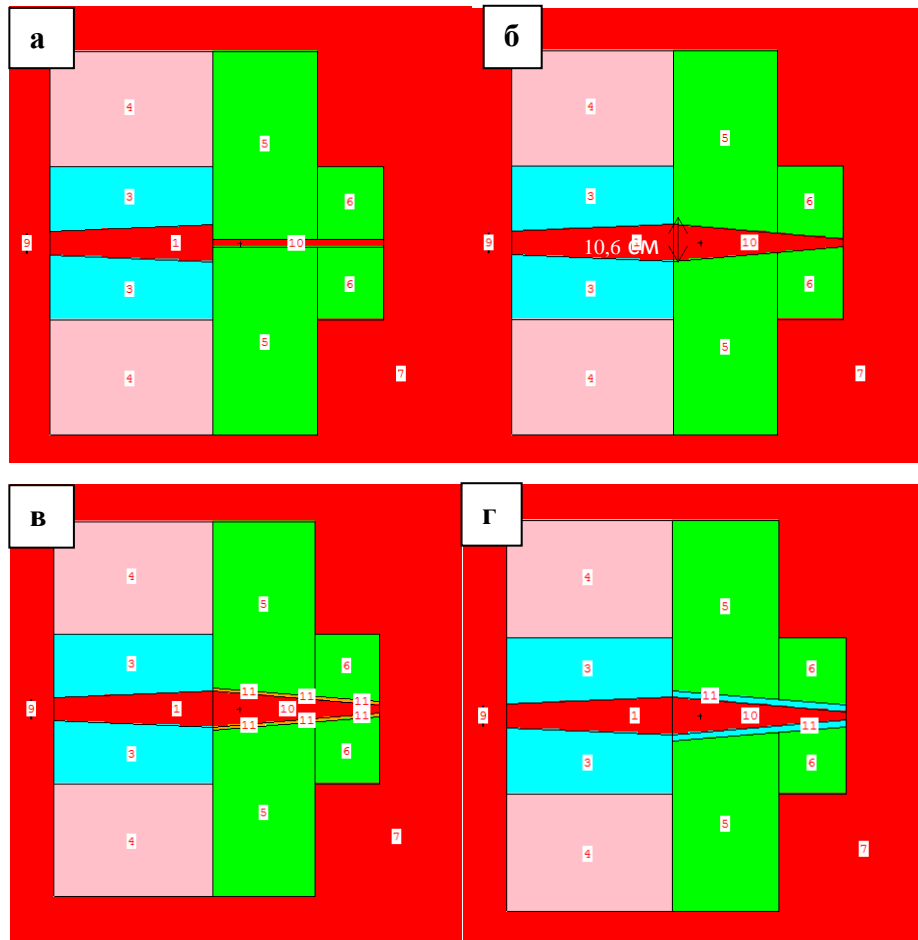


Рисунок 8. Профили коллиматоров, полученные с помощью кода MCNP для различных геометрий полиэтиленовой части: (а) - полиэтиленовый коллиматор с исходной геометрией; (б) - полиэтиленовый коллиматор с изменённой геометрией; (в) – коллиматор с дополнительным слоем свинца толщиной 1 см; (г) – коллиматор с дополнительным слоем железа толщиной 2 см. Цифры на рисунках относятся к ячейкам в коде MCNP.

Результаты расчета доз и плотности потоков нейтронов для четырех коллиматоров, изображённых на рисунке 8, представлены в таблице 3. Их сравнивали с данными для коллиматора с полиэтиленовой частью с апертурой $4,5 \times 4,5 \text{ см}^2$ (как на рисунке 7а). Оказалось, что можно получить узкий пучок нейтронов с более высокой плотностью потока при выполнении внутренней структуры полиэтиленовой части в виде конуса с начальным диаметром 10,6 см.

Таблица 3. Мощность дозы и плотность потока нейтронов, рассчитанные с помощью кода MCNP, для четырех коллиматоров (а), (б), (в), (г), которые имеют узкую апертуру (2 см), и сравниваются с коллиматором с размером апертуры $4,5 \times 4,5 \text{ см}^2$ для тока дейтронов 30 мкА.

	(а)	(б)	(в)	(г)	коллиматор $4,5 \times 4,5 \text{ см}^2$
Дозы, Гр/мин	0.012	0.174	0.177	0.175	0.17
Интенсивность потока нейтронов ($\times 10^8$ нейтрон $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)	0.078	1.10	1.12	1.11	1.07

На рисунке 10 представлены результаты экспериментов и расчетов по определению плотности потока нейтронов для каждого коллиматора, описанного во второй главе, в таблице 1 и на рисунках 1 и 2. Значения приведены для энергетической группы, связанной с порогами обнаружения нейтронов различными фольгами.

Формы этих небольших коллиматоров с отверстием $5 \times 5 \text{ см}^2$ были представлены на рисунке 9.

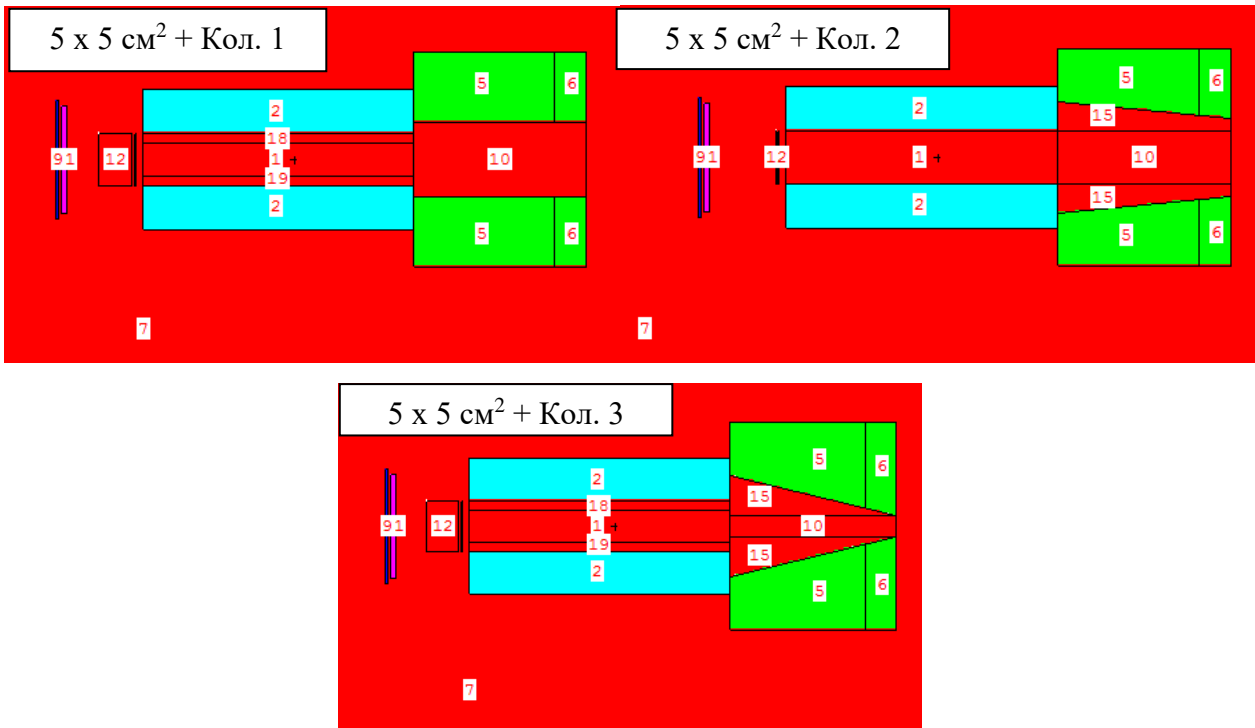
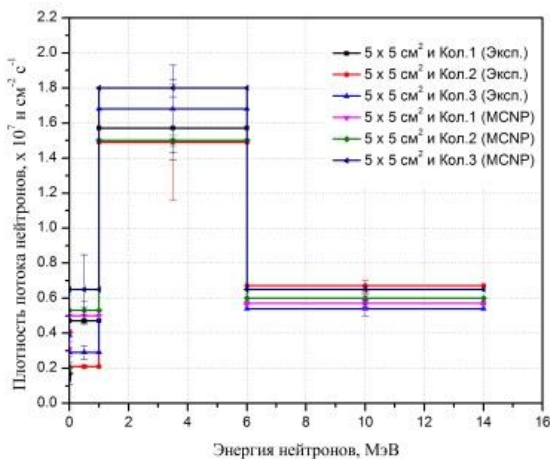
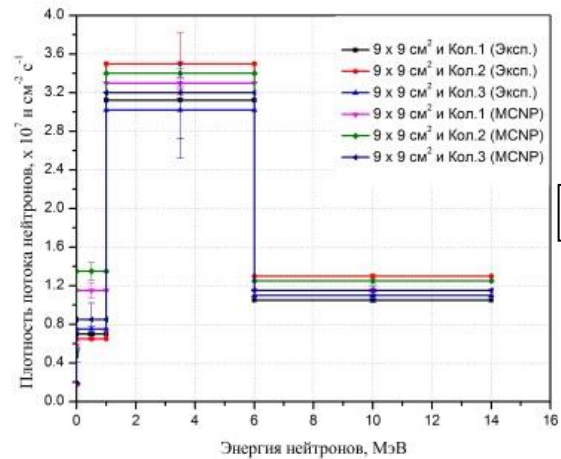


Рисунок 9. Продольное сечение схемы коллиматора $5 \times 5 \text{ см}^2$ (выделено бирюзовым цветом) с тремя типами парафиновых частей Кол. 1, Кол. 2 и Кол. 3 (выделено зеленым). Мишень и ее медная форма расположены на расстоянии 7 см с левой стороны от коллиматора. Цифры на рисунках относятся к ячейкам в коде MCNP.



а



б

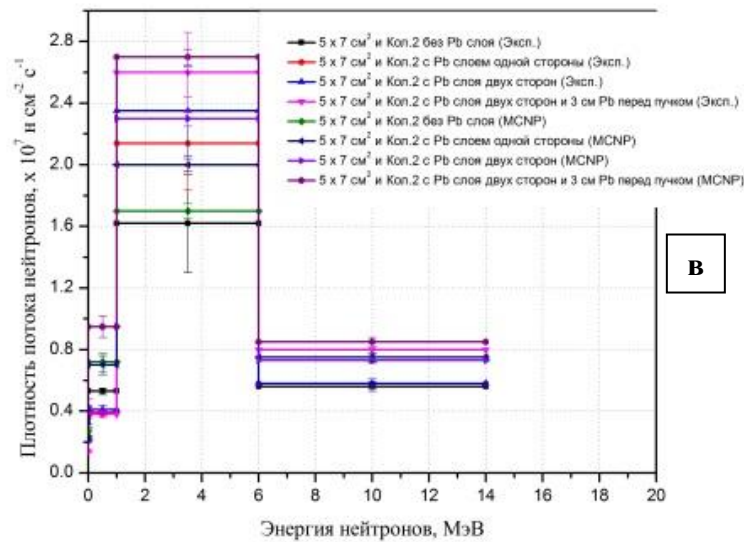


Рисунок 10. Результаты расчётов (помощью кода MCNP) и экспериментов по определению спектров нейтронов для коллиматора с парафиновыми элементами (Кол. 1, Кол. 2, Кол. 3) и открытым отверстием на входе. Сечение канала на входе: (а) - 5 x 5 см², (б) - 9 x 9 см² и (в) - 7 x 5 см².

На рисунке 10 показаны значительные различия в потоках быстрых нейтронов при сравнении коллиматора 7 x 5 см² со слоем свинца на внутренних стенках, а также при добавлении 3-см слоя свинца перед коллиматором по сравнению с изделием, у которого нет этих дополнительных слоев.

Прирост потока быстрых нейтронов составляет ~ 68% в диапазоне энергий 1-6 МэВ. Наши результаты свидетельствуют о том, что имеет место значительное увеличение плотности потока быстрых нейтронов при добавлении слоев металлического свинца на внутренние поверхности коллиматора.

Этот эффект связан с упругим рассеянием быстрых нейтронов на свинце и железе. Кроме того, взаимодействие (n, 2n) играет существенную роль в этом процессе. Сечение реакции (n, 2n) для свинца в диапазоне 8 - 20 МэВ имеет относительно высокое значение по сравнению с другими элементами, такими как Fe, Be, W, Bi, In и другие (JEFF-3.3) [7]. Например, для Pb и Fe они составляют 2,2 и 0,6 бн соответственно.

Эти данные согласуются с результатами работ других авторов [8-12], которые подтверждают целесообразность оптимизации материальных и геометрических параметров коллиматора для увеличения плотности потока и улучшения спектра нейтронов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в процессе подготовки данной диссертации к защите, позволили сформулировать несколько выводов и рекомендаций, которые могут быть полезны для разработки источников быстрых нейтронов на основе циклотрона с перспективой их практического применения в нейтронно-лучевой радиотерапии.

1. Мишень, спрессованная из металлического порошка бериллия, и использованная в наших экспериментах, не имеет склонности к значительному разогреву и не

нуждается в принудительном охлаждении. Мы заметили, что она не повреждается пучком. Возможно, что это связано с её малой плотностью и меньшими по сравнению с литой мишенью линейными потерями энергии налетающих дейтронов при их торможении. По крайней мере, в диапазоне плотности мощности пучка, использованного в данной работе.

2. Использование прессованного порошка Be в медной форме в качестве мишени приводит к существенному увеличению плотности потока нейтронов. Он возрастает по сравнению с твердой литой мишенью примерно 1,6 раза или более в диапазоне энергий нейтронов 1 – 6 МэВ. Вероятная причина этого эффекта связана с реакцией $\text{Cu}(n, 2n)$.

3. Результаты моделирования переноса быстрых нейтронов с использованием кода PHITS показали, что замена в мишени бериллия на литий позволяет увеличить выход нейтронов в 2,4 раза при использовании дейтронов с энергией 12 МэВ. Максимальный их выход имеет место в случае, когда облучение мишени производится дейтронами (условно принято за 100%). Для протонов он составляет 22% и для альфа-частиц - 2,4%.

4. Моделирование переноса быстрых нейтронов с помощью кода MCNP и результаты экспериментальных исследований показали, что существенное увеличение плотности их потока (примерно в 3 раза по сравнению с первыми конструкциями) физически возможно и практически достижимо путем оптимизации материальных и геометрических параметров коллиматора.

5. Доказана возможность получения узкого пучка нейтронов (диаметром 1-2 см или даже менее). Это позволяет значительно (в 14,1 раза) увеличить плотность потока быстрых нейтронов по сравнению с цилиндрическим каналом. Есть основание надеяться, что узкие пучки сделают методику нейтронно-лучевой радиотерапии лечения небольших и неправильной формы опухолей более точной и безопасной для пациента.

6. Доля плотности потока быстрых нейтронов с энергией в интервале 1 – 6 МэВ составляет около 83%. Это позволяет свести к минимуму количество нежелательных для клинического применения нейтронов с энергией выше 6 МэВ и ниже 1 МэВ, которые не способствуют процессу лучевой терапии. В итоге мы минимизируем дозу, поглощаемую здоровыми тканями.

7. Предложен ряд выражений, полученных на основе выполненных экспериментов, позволяющий оценивать среднюю энергию и плотность потока нейтронов в зависимости от энергии дейтронов. Они дают корректные результаты в диапазоне энергий от 0,5 до 50 МэВ при расчёте плотности потока нейтронов и в диапазоне от 2,6 до 40 МэВ при расчёте их средней энергии нейтронов.

Список цитируемой литературы

1. Shehada, A.M. Probing yields and angular distributions of $\text{Be}(d,n)$ neutrons with novel target of compressed beryllium-powder / A.M. Shehada, V.P. Krivobokov, I.V. Lomov, A.A.

Garapatsky, R. Mardelli, A.J. Othman // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – V. 197. – P. 110178.

2. Shehada, A. M. Angular Distribution of Neutrons Around Thick Beryllium Target of Accelerator-Based $^9\text{Be}(d, n)$ Neutron Source / A.M. Shehada, V.M. Golovkov // ASME J of Nuclear Rad Sci. – 2020. – V. 6, № 2. – P. 021111.

3. Weaver, K.A. Neutron Spectra from Deuteron Bombardment of D, Li, Be, and C / K.A. Weaver, D. Anderson, H.H. Barschall, J.C. Davis // Nucl. Sci. Eng. – 1973. – V. 52, № 1. – P. 35–45.

4. Keith, A.W. Neutrons from Deuteron Bombardment of Light Nuclei. PhD thesis / A.W. Keith // University of Wisconsin, Madison, 1972. – 82 p.

5. Weaver, K.A. Neutrons from the bombardment of beryllium by deuterons / K.A. Weaver, J.D. Anderson, H.H. Barschall, J.C. Davis // Phys. Med. Biol. – 1973. – V. 18, № 1. – P. 64–70.

6. Stefanik, M. Neutron spectrum determination of accelerator-driven $d(10)+\text{Be}$ neutron source using the multi-foil activation technique / M. Stefanik, E. Simeckova, P. Bem, J. Stursa, V. Zach // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – V. 190. – P. 109767.

7. Plompen, A.J.M. The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF-3.3 / A.J.M. Plompen, O. Cabellos, C.D.S. Jean, M. Fleming, A. Algora, et al // Eur. Phys. J. A. – 2020. – V. 56, № 181. – P. 1–108.

8. de Haan, V. A high performance neutron moderator design / V. de Haan // Nucl. Instrum. Meth A. – 2015. – V. 794. – P. 122–126.

9. Iverson, E.B. Enhancing Neutron Beam Production with a convoluted Moderator / E.B. Iverson, D.V. Baxter, G. Muhrer, S. Ansell, R. Dalglish, et al // Nucl. Instr. Meth. A. – 2014. – V. 762. – P. 31–41.

10. Zhao, J.K. Optimizing moderator dimensions for neutron scattering at the spallation neutron source / J.K. Zhao, J.L. Robertson, K.W. Herwig, F.X. Gallmeier, B.W. Riemer // Rev. Sci. Instrum. – 2013. – V. 84, № 12. – P. 125104.

11. Nuclear data for neutron therapy: status and future needs. TECDOC 992: IAEA, 1997. – 129 P.

12. Schönfeldt, T. Nucl. Broad spectrum moderators and advanced reflector filters using ^{208}Pb / T. Schönfeldt, K. Batkov, E.B. Klinkby, B. Lauritzen, F. Mezei, et al // Instrum. Meth A. – 2015. – V. 769. – P. 1–4.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Shehada, A. M.** Angular Distribution of Neutrons Around Thick Beryllium Target of Accelerator-Based $^9\text{Be}(d, n)$ Neutron Source / A.M. Shehada, V.M. Golovkov // ASME J of Nuclear Rad Sci. – 2020. – V. 6, № 2. – P. 021111.

2. **A.M. Shehada.** Improving Neutron Flux by Optimizing the Geometries and Materials of the Collimation Assembly for Fast Neutron Therapy / V.M. Golovkov, A.M. Shehada // Журнал медицинской физики. – 2019. – № 2. – Т. 82.

3. **Shikhada, A.M.** Optimizing the source of fast neutrons for therapy applications/ A.M. Shikhada, V.M. Golovkov V.M // Research and Practical Medicine Journal. – 2019. – V. 6. – №. 1S. – P. 295.

4. **Shehada, A.M.** The dependencies of fast neutron flux and spectra on the collimation-field size and geometry for fast neutron therapy purposes / A.M. Shehada, V.P. Krivobokov // Radiation Effects and Defects in Solids. –2021. – V. 176. – №. 9 –10. – P. 777 –788.

5. **Shehada, A.M.** Evaluating the Dependency of Neutron Spectra and Absorbed Dose Rates on the Collimation Field Size in Fast Neutron Therapy / A.M. Shehada, V.P. Krivobokov, V.M. Golovkov // Heliyon. – 2021. –V. 7. – №. 11. – P. e08274.

6. **Shehada, A.M.** Simulation study of the response of a highly sensitive silver activation detector for neutron detection using MCNP code / A.M. Shehada, V.P. Krivobokov // Radiation Physics and Chemistry. – 2021. – V. 189. – P. 109732.

7. **Shehada, A.M.** MCNP Simulations for Silver-Plastic Scintillator Detector for Mono-Energy Neutrons 2.5 and 14 MeV / A.M. Shehada, I.N. Pyatkov, V.P. Krivobokov, A.J. Othman // Phys. Part. Nuclei. Lett. – 2021. №. 18. –P. 786 –790.

8. **Shehada, A.M.** Probing yields and angular distributions of $\text{Be}(d,n)$ neutrons with novel target of compressed beryllium-powder / A.M. Shehada, V.P. Krivobokov, I.V. Lomov, A.A. Garapatsky, R. Mardelli, A.J. Othman // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – V. 197. – P. 110178.