

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра **ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
научно-исследовательский формат

Коновалова Виктория Дмитриевна

Тема работы: Получение холодных нейтронов на ускорительном источнике
нейтронов

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

к.ф.-м.н.
снс ИЯФ СО РАН

Сковородин Д.И./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

к.ф.-м.н,
снс ИЯФ СО РАН

Касатов Д.А./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

к.ф.-м.н,
снс ИЯФ СО РАН

Поросев В.В./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2023

Оглавление

Введение.....	3
1. Описание экспериментальной установки.....	5
2. Замедление нейтронов.....	9
2.1 Параметры замедлителей из воды.....	10
3. Моделирование.....	11
3.1 Программный инструментарий Geant4.....	11
3.2 Моделирование экспериментов по получению холодных нейтронов.....	13
4. Описание эксперимента и обсуждение результатов.....	17
4.1 Постановка эксперимента.....	18
4.2 Обсуждение результатов эксперимента.....	21
Заключение.....	25
Список литературы.....	26

Введение

Данная работа посвящена поиску оптимального решения для замедления нейтронов, получаемых на ускорительном источнике эпитепловых нейтронов в ИЯФ СО РАН, до уровня холодных нейтронов, т.е. снижения их энергии до $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$ эВ. В природе нейтроны в основном существуют в связанном с атомным ядром состоянии и в свободном состоянии живут недолго (время полураспада около десяти минут) [1]. Нейтроны получают на исследовательских ядерных реакторах в ходе ядерных реакциях, при этом нейтроны имеют энергию порядка МэВ. Они обладают такой энергией, поскольку при их получении свободным нейтронам необходимо преодолеть энергию связи в ядре, а для большинства изотопов она составляет 7 – 9 МэВ на нуклон [2]. Также нейтроны можно получать на ускорительных источниках. Такой способ позволяет генерировать нейтроны узкого, варьируемого энергетического спектра, используя компактную экспериментальную установку. Нейтроны, в зависимости от энергии, разделяют на:

- Сверхбыстрые ($E_n \geq 20$ МэВ) и быстрые ($E_n = 200$ кэВ – 20МэВ);
- Медленные ($E_n = 1 - 100$ эВ);
- Надтепловые ($E_n = 0,1 - 10$ эВ) и тепловые ($E_n = 0,005 - 0,1$ эВ);
- Холодные ($E_n \leq 0,005$ эВ) и ультрахолодные ($E_n \leq 10^{-7}$ эВ) [3].

Замедление нейтронов является сложной задачей, требующей оригинальных решений. В настоящее время в России холодные нейтроны успешно получают командой ОИЯИ. Получаемые на исследовательском ядерном реакторе ИБР-2 нейтроны замедляются с помощью шариков из твердого метана [4]. На ИБР-2 регистрация холодных нейтронов осуществляется времяпролетным методом. В ПИЯФ НИЦ КИ холодные нейтроны получают на реакторе ВВР-М, замедляя их на водороде и дейтерии [5]. Кроме того, холодные нейтроны получают в Венгрии, Австралии и др. странах. Интерес к холодным нейтронам обусловлен тем, что низкоэнергетичные, незаряженные частицы имеют большие перспективы применения, они открывают новые возможности в области исследования структуры и свойств материалов (метод

нейтронного дифракционного рассеяния) [6], биологии, ядерной техники и т.д. Особый интерес получение холодных нейтронов представляет для области ядерной медицины, а именно бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [7]. В настоящее время для БНЗТ наиболее подходящими считаются нейтроны с энергией от 1 до 30 кэВ. Однако волновые свойства холодных нейтронов позволят транспортировать их по гибким нейтроноводам непосредственно к злокачественным новообразованиям [8]. Это повысит локализацию радиационной дозы и безопасность проведения терапии.

Целью работы является получение холодных нейтронов на компактном ускорительном источнике в ИЯФ СО РАН. Для этого требуется решить следующие задачи:

1. Изучить явления поглощения и замедления нейтронов.
2. Разработать систему формирования пучка холодных нейтронов.
3. Подобрать материалы для системы формирования пучка холодных нейтронов и оценить их линейные размеры.
4. Подобрать подходящее программное обеспечение для моделирования прохождения нейтронов через вещество.
5. Промоделировать прохождение нейтронов через разработанную систему и показать возможность получения с ее помощью холодных нейтронов.
6. Экспериментально проверить замедляющие и рассеивающие свойства выбранных материалов, выявить эффективную длину замедляющей части.

Для решения этих задач был проведен обзор литературы, соответствующий тематике работы. Промоделировано прохождение нейтронов через материалы замедлителя и систему формирования пучка холодных нейтронов. На оборудовании Института Ядерной Физики СО РАН были проведены эксперименты, в ходе которых получены холодные нейтроны.

1. Описание экспериментальной установки

Работа была выполнена на ускорительном источнике нейтронов в ИЯФ СО РАН. Схема установки представлена на рисунке 1. В данной работе установка использовалась для получения эпитепловых нейтронов. В основном нейтроны на ускорительном источнике получают бомбардировкой литиевой мишени протонами. Пучок отрицательных ионов водорода, инжектируемый из источника 1, фокусируется на вход ускорителя 3. Далее пучок отрицательных ионов ускоряется до 1 МэВ, после чего, в газовой обдирочной мишени, установленной внутри высоковольтного электрода ускорителя, отрицательные ионы с вероятностью 90 – 95 % теряют 2 электрона, становятся протонами и затем ускоряются до 2 МэВ. Затем пучок протонов направляется на литиевую мишень 13, которая может быть расположена в вертикальной части тракта транспортировки за шиббером 16 или в горизонтальной части за шиббером 11. В данной работе применялся горизонтальный тракт транспортировки пучка. Литий был выбран в качестве материала для мишени так как реакция ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, имеющая максимальный выход и минимальную энергию нейтронов, не превышающую 1 МэВ, подходит наилучшим образом для образования пучка нейтронов эпитеплового диапазона [9]. Полученные таким образом нейтроны направлялись на прототип системы формирования пучка холодных нейтронов (СФП), после прохождения которого они фиксировались обогащенным бором полистирольным сцинтилляторным нейтронным счетчиком (ИФВЭ НИЦ КИ, Протвино) [10]. Регистрация нейтронов происходит за счет реакции ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ в пластиковом сцинтилляторе. В ходе реакции образуются α -частицы, которые вызывают сцинтилляционные импульсы, усиливающиеся фотоумножителем. Далее сигнал регистрируется и передается на персональный компьютер [11].

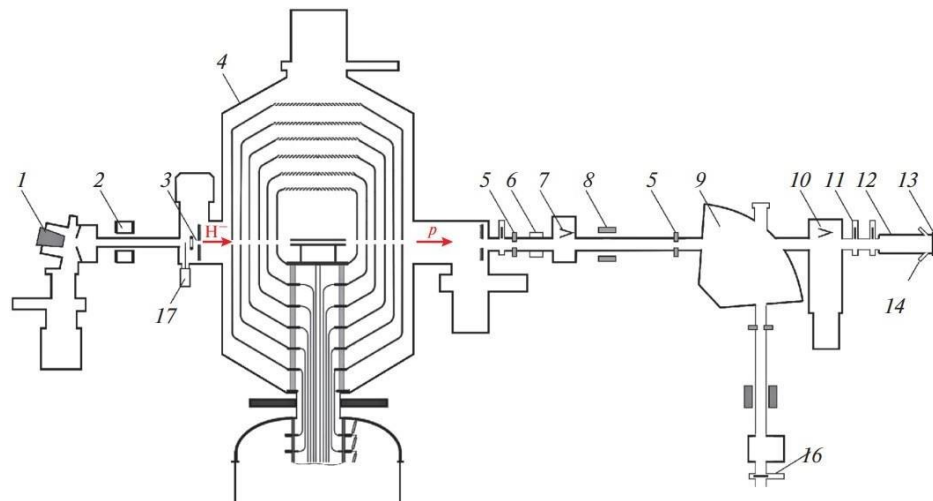


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки: 1 – источник отрицательных ионов водорода; 2 – магнитная линза; 3 – входная охлаждаемая диафрагма ускорителя; 4 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией; 5 – охлаждаемая диафрагма с апертурой 26 мм; 6 – бесконтактный датчик тока; 7 – выдвижной цилиндр Фарадея в диагностическом баке на выходе из ускорителя; 8 – корректор; 9 – поворотный магнит; 10 – выдвижной цилиндр Фарадея в диагностическом баке за поворотным магнитом; 11, 16 – шиберы; 12 – вакуумная камера; 13 – литиевая мишень; 14 – патрубки с окнами для наблюдения; 17 – проволочный сканер.

Спектр полученных таким образом нейтронов был определен двумя моделированиями, основанными на численном методе Монте-Карло: программой PINO [12] (рисунок 2) и инструментарием Geant4 [16] (рисунок 3). С использованием PINO был проведен расчет энергетического спектра нейтронного пучка, получаемого на ускорительном источнике нейтронов. В качестве начальных параметров моделирования использовались: толщина лития на мишени 100 мкм, радиус мишени 100 мм и начальная энергия налетающих протонов 2050 кэВ. Спектры рождающихся на литиевом слое нейтронов представлены на рисунках 2, 3. Для дальнейших оценок, опираясь на результаты моделирования, начальную энергию нейтронов E_0 , генерируемых в реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ примем равной средней энергии начального нейтронного пучка 50 кэВ. Спектр нейтронов, полученный с использованием Geant4, использовался на этапе моделирования для описания потока нейтронов от литиевой мишени.

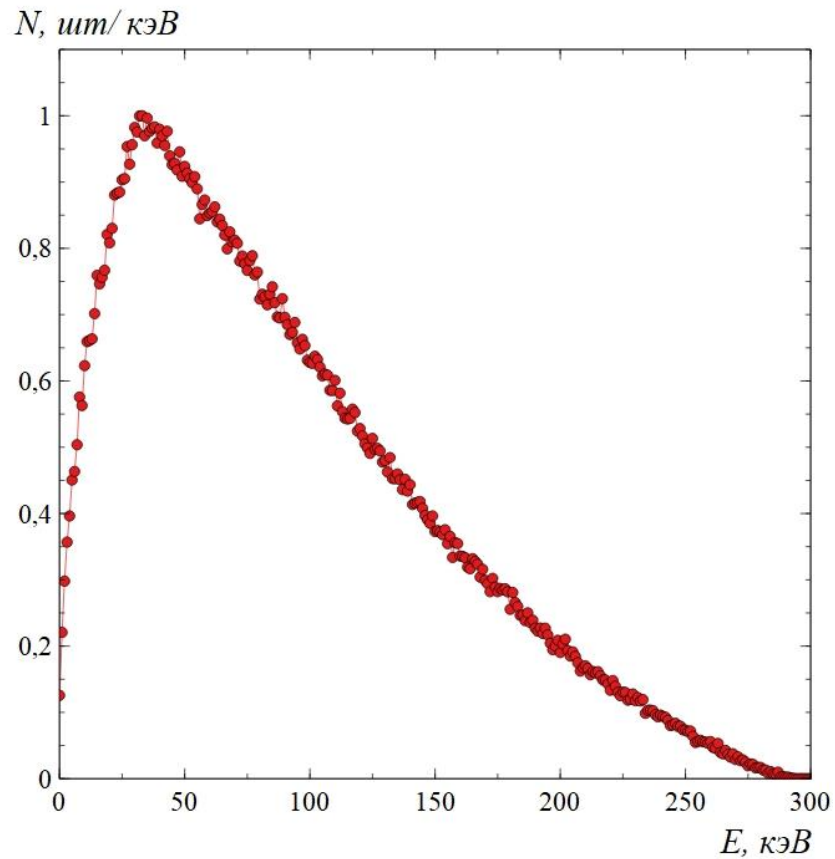


Рисунок 2 - Промоделированный при использовании программы PINO энергетический спектр нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^8\text{Be}$

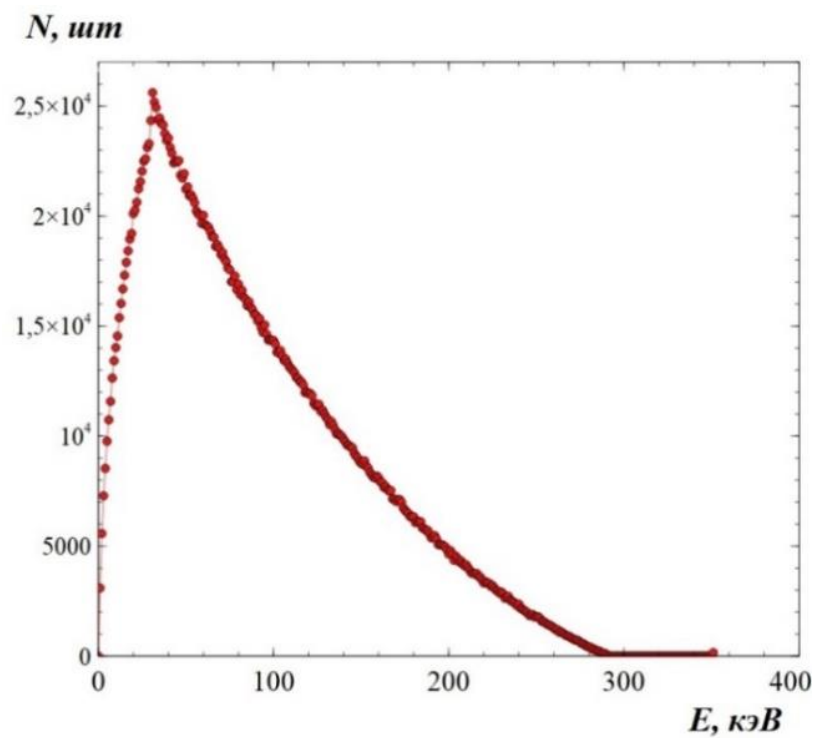


Рисунок 3 - Полученный моделированием в Geant4 спектр нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$

Ускорительный источник нейтронов также позволяет генерировать нейтроны в беспороговой реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$. В таком режиме работы источника генерируются нейтроны широкого диапазона энергий, включая быстрые нейтроны. Схема генерации нейтронов в данном режиме аналогична основному режиму генерации нейтронов при помощи протонного пучка, отлична лишь тем, что отрицательные ионы дейтерия от источника *1* проходят обдирочную мишень и на выходе из ускорителя-тандема *4* получают дейтроны, которые также направляются на литиевую мишень *13*. Спектр нейтронов, генерируемых в реакции лития с дейтерием, был получен экспериментально с использованием спектрометра UNSD-15 (рисунок 4).

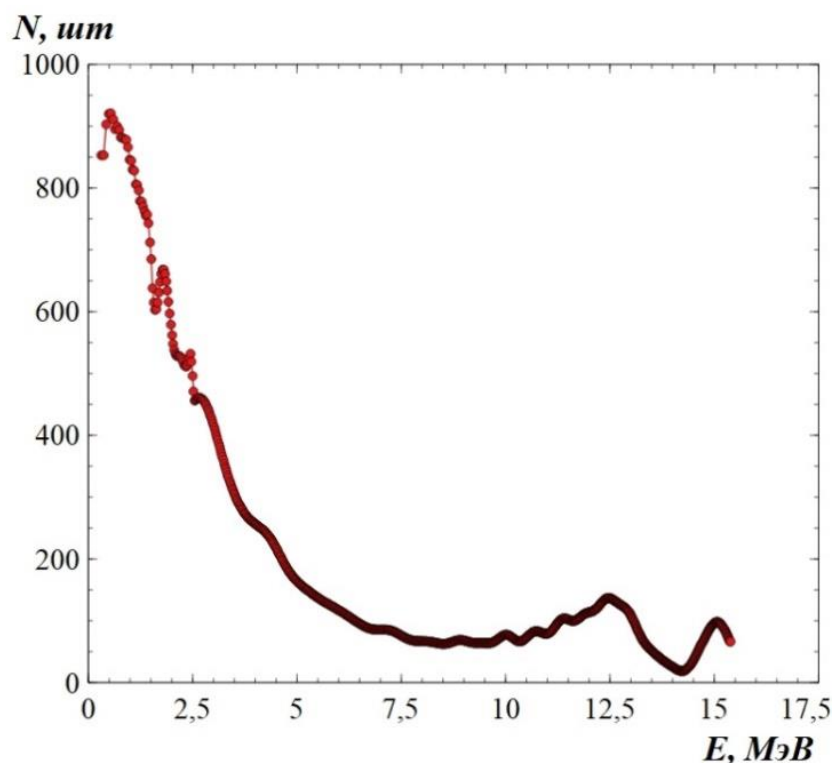


Рисунок 4 - Спектр нейтронов генерируемый в реакции ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$

В экспериментальной части данной работы использовался основной режим работы ускорительного источника нейтронов – с использованием протонного пучка. При моделировании экспериментов по прохождению нейтронов через систему формирования пучка холодных нейтронов были рассмотрены оба режима генерации нейтронов: с дейтериевым пучком и протонным.

2. Замедление нейтронов

Нейтроны с энергией менее 10^{-2} эВ широко применяются в различных областях физики. Для снижения энергии нейтронов используют замедлитель нейтронов – среду, в которой скорость нейтронов уменьшается, при этом нейтроны почти не захватываются молекулами среды. Известно, что, в основном, нейтроны теряют энергию в результате упругих столкновений с атомными ядрами. Только первые несколько столкновений высокоэнергичных нейтронов с атомами материала замедлителя можно считать неупругими. При рассеянии нейтронов на ядрах однородной среды кинетическая энергия нейтрона уменьшается экспоненциально: $E_k = E_0 \exp(-\xi k)$, E_0 – начальная энергия нейтрона, E_k – энергия нейтрона после k последовательных рассеяний, ξ – величина среднелогарифмической потери энергии:

$$\xi = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}, \text{ где } A \text{ – массовое число атома [13].}$$

Максимальная энергия, которую может передать нейтрон в результате столкновения с ядрами атома $E_{max} \approx \frac{2 \cdot A}{(A+1)^2}$ [13]. Отсюда следует, что в качестве замедлителей лучше использовать водородосодержащие материалы, так как для водорода $A = 1$. Другой важный фактор, который необходимо учитывать при выборе материала замедлителя – степень поглощения нейтронов атомами материала. Следует подобрать такой материал, в котором нейтроны максимально теряют свою энергию, при этом минимально поглощаясь. Наиболее часто для замедления нейтронов до уровня холодных используют системы, содержащие жидкий водород, лед, твердый метан, графит. Также в качестве замедлителей исследуют: бериллий, алюминий, висмут и свинец. Эти материалы обладают малым коэффициентом поглощения нейтронов, химически стабильны и не претерпевают фазовые переходы в широких областях температур [14]. В таблице 1 приведены параметры часто используемых замедлителей нейтронов. Из нее видно, что в качестве замедлителя можно рассмотреть тяжелую воду D_2O , углекислый газ CO_2 и гелий He. В наших экспериментах в качестве исследуемого замедлителя был

выбран оксид дейтерия. Для сравнения, коэффициент замедления K_s (отношение замедляющей способности вещества $\xi \cdot \Sigma_s$ к макросечению поглощения Σ_a) для воды составляет 61, а для тяжелой воды – 1450 [13, Таблица 2].

Таблица 1. Характеристики распространенных замедлителей

Теплоноситель	Температура плавления, К	Температура кипения, К	Плотность, кг/м ³	Сечение захвата тепловых нейтронов, барн (10^{-28} м^2)
H ₂ O	273	373	998	0,6
D ₂ O	277	374	1106	0,009
CO ₂	–	195	1,98	0,005
He	–	4	0,18	0,001
⁷ Li	454	1616	531	$3,85 \cdot 10^{-5}$
¹⁰ B	2348	4138	-	19,8
¹² C	3647	4473	-	$3,8 \cdot 10^{-3}$
¹⁶ O	54,8	90,2	-	$2 \cdot 10^{-4}$

2.1 Параметры замедлителей из воды

В данной работе проверялись замедляющие свойства воды и D₂O. В таблице 2 приведены характеристики воды и D₂O для нейтронов с энергией от 1 эВ до 1 МэВ [15].

Таблица 2. Характеристики воды и D₂O

Вещество	Характеристики				
	$\rho, \text{ г/см}^3$	ξ	$\Sigma_s, \text{ см}^{-1}$	$\xi \Sigma_s, \text{ см}^{-1}$	K_s
H ₂ O	1	0.926	1.495	1.35	61
D ₂ O	1.1	0.509	0.352	0.179	1450

ρ – плотность вещества

Для проведения эксперимента были выполнены оценки длины замедлителя. Для этого было вычислено количество актов рассеяния нейтрона на ядрах вещества, необходимое для снижения его энергии с начальной E_0 до энергии

холодных нейтронов (порядка 10^{-4} эВ). Была оценена длина свободного пробега нейтрона в веществе. Оценки проводились в предположении, что основной вклад в потерю нейтронами энергии вносят их упругие соударения с ядрами материала замедлителя.

Количество актов рассеяния N_B для воды и для тяжелой воды N_D рассчитывалось по следующим формулам:

$$N_B = 0,83 \ln \frac{E_0}{E},$$

$$N_D = 1,33 \ln \frac{E_0}{E}.$$

Длина свободного пробега до поглощения l :

$$l = \frac{A}{N_a \cdot \rho \sigma_{\text{захв}}}.$$

Для замедления нейтронов до уровня тепловых получаем: $N_B = 15$, $N_D = 23$,
 $l_B = 45$ см, $l_D = 37037$ см.

Оценка длины замедлителя L производилась по следующей формуле:

$$L = \frac{\sqrt{N}}{\Sigma_S}.$$

Опираясь на полученные значения длины свободного пробега до поглощения, можем предположить, что в замедлителе из тяжелой воды нейтроны не будут существенно поглощаться. Геометрические размеры замедлителя должны превышать 3 см для воды и 14 см для тяжелой воды.

3. Моделирование

3.1 Программный инструментарий Geant4

В данной работе для моделирования прохождения частиц через систему замедления нейтронов было выбрано программное обеспечение Geant4. Geant4 – свободно распространяемый программный инструментарий, разработанный на объектно-ориентированном языке программирования C# международным объединением ученых с центром в CERN. Geant4 представляет собой набор классов и библиотек, которые позволяют описать

физический эксперимент достаточно точно. Внутренние средства программного обеспечения для моделирования позволяют детально описать: геометрию эксперимента, химический состав и физические свойства необходимых материалов, тип частиц, присутствующих в эксперименте и физические процессы, в которые вовлечены частицы. Geant4 состоит из порядка 700 классов и предусматривает возможность описать:

- Тип и свойства частиц. К примеру, при помощи класса `G4ParticleDefinition` пользователь может задать массу, спин и другие свойства частицы. `G4DynamicParticle` позволяет описать динамические характеристики частицы – энергию, поляризацию, момент количества движения и другие.
- Метод генерации частиц. `G4PrimaryGeneratorAction` – базовый класс, позволяющий задать тип и свойства генерируемых частиц, а также форму их пучка.
- Физические процессы. Взаимодействие частиц с материалами позволяет описать класс `G4PhysicsList`. Пользователь может сам задавать физические процессы для генерируемых частиц или использовать уже готовые, подходящие пакеты.
- Описание геометрии системы. `G4DetectorConstruction` – основной класс, использующийся для описания геометрии системы. Включает в себя задание размеров входящих в систему объектов, их расположение относительно друг друга и материалы. Геометрию системы можно экспортировать из внешних файлов, если требуется детальное описание каждого объекта. Пользователь может создавать химические элементы при помощи класса `G4Element` и из них создать необходимый материал.
- Визуализация. В данной работе для визуализации результатов моделирования использовался инструмент программного обеспечения `Cortana3D`. Кроме того для визуализации трека частиц можно использовать `OpenGL`, `OpenInventor`, `HepRep`, `DAWN`.

Geant4 базируется на численном методе Монте-Карло и позволяет с большой точностью моделировать прохождение частиц через вещество. Так, Geant4 часто применяется в ядерной физике, физике элементарных частиц, космологии и т.д.

Процесс компиляции программы можно разделить на несколько этапов: в начале работы конструируется геометрия системы и подгружаются сечения процессов взаимодействия указанных в коде частиц с описанными материалами, затем запускаются частицы, создаются треки частиц. Движение частиц представляет собой множество мелких шагов, на каждом из которых происходит выбор и реализация одного из заданных физической моделью кода взаимодействий в порядке, определяемом рассчитанными на первом этапе сечениями взаимодействий. Так моделирование продвижения частицы продолжается до ее полной потери энергии, если пользователем не указана другая причина остановки и удаления частицы. Для образованных в процессе моделирования вторичных частиц треки создаются таким же образом. Все частицы, запущенные описанным в коде источником частиц, и вторичные частицы обрабатываются так, что на каждом шаге частиц пользователь может получить полную информацию о них (энергия, координата, импульс и т.д.) [16].

3.2 Моделирование экспериментов по получению холодных нейтронов

Для моделирования прохождения нейтронов через систему формирования пучка холодных нейтронов использовался инструментарий Geant4.

Для того чтобы промоделировать прохождение низкоэнергетических нейтронов через вещество, были использованы процессы пакета физики G4NeutronHP: neutronElastic (включая тепловое рассеяние), neutronInelastic, nCapture, nFission. Пакет физик G4NeutronHP рекомендован для описания физических процессов с участием нейтронов с энергией ниже 20 МэВ [17].

Моделирование в работе можно разделить на два этапа: на первом этапе было промоделировано прохождение нейтронов через упрощенную

геометрию для исследования влияния температуры материалов на результат моделирования в Geant4. На втором этапе проводилось моделирование прохождения нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике ИЯФ СО РАН, через СФП холодных нейтронов.

На первом этапе моделирования геометрия системы состояла из следующих элементов: изотропного источника нейтронов с энергией 0,8 эВ 1, генерирующего 10^8 частиц; замедлителя из тяжелой воды при температурах 300 и 73 К и с продольным размером 20 см 2; чувствительной области в качестве детектора 3 (рисунок 5). В результате моделирования были получены гистограммы энергии попавших в детектор частиц и их количества. Разбиение задавалось в диапазоне энергий от 0 до 1 эВ с шагом в 10^{-3} эВ.

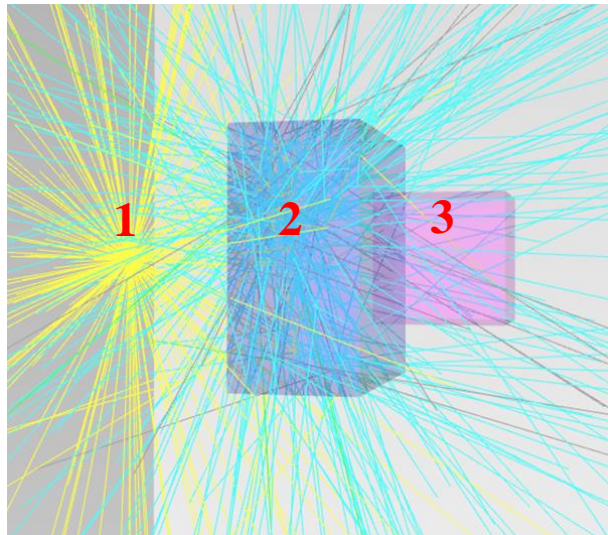


Рисунок 5 - Схема моделирования прохождения нейтронов через тяжелую воду: 1 – источник нейтронов, 2 – тяжелая вода, 3 – чувствительная область. Линиями желтого цвета обозначены траектории нейтронов, линиями голубого и коричневого цвета – вторичных частиц

Таким образом получены зависимости количества пройденных через замедлитель нейтронов от их энергии. На рисунке 6 видно, что при прохождении замедлителя при комнатной температуре, большая часть нейтронов термализуется, а при прохождении замедлителя при температуре 73 К основная часть спектра нейтронов смещается в низкоэнергетическую область. Таким образом, результаты первого этапа моделирования показали возможность использования инструментария Geant4 для описания геометрии с объектами с низкой температурой.

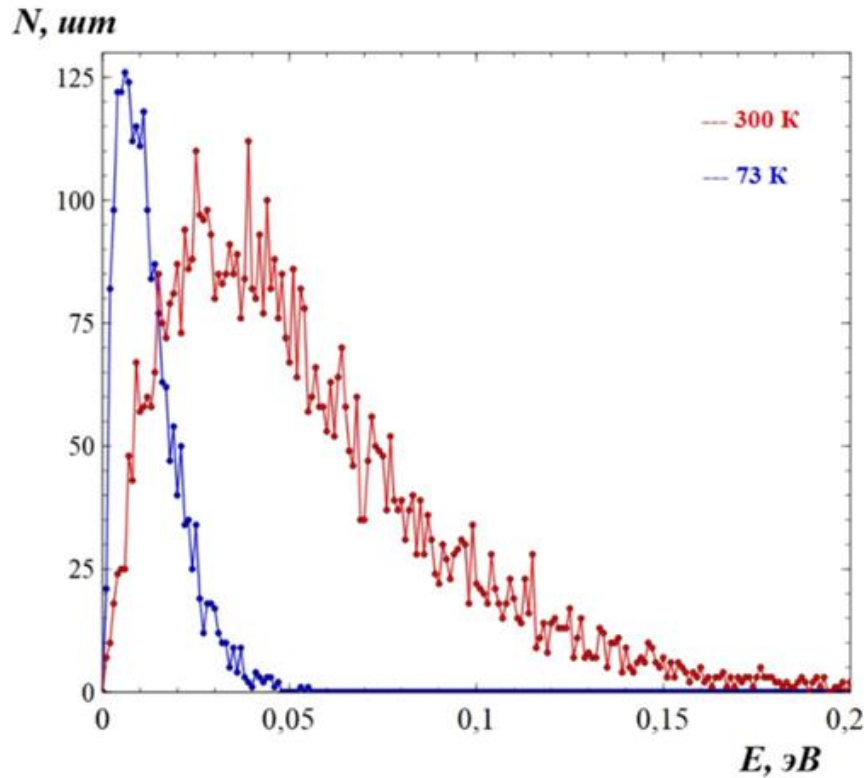


Рисунок 6 - Результаты моделирования прохождения нейтронов через тяжелую воду при различной температуре

На втором этапе моделирования, при описании источника нейтронов, был использован спектр нейтронов, генерируемых в ходе реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ на ускорительном источнике нейтронов (рисунок 3).

Геометрия для моделирования была описана следующим образом: от источника нейтроны направлялись, в соответствии с заданным угловым распределением, на систему формирования пучка холодных нейтронов. Система замедления состояла из оргстекла, тяжелой воды, свинцовых пластин, бетона. После прохождения системы замедления нейтроны попадали в чувствительную область, в которой происходил сбор информации об их энергии (рисунок 7). Данные были получены в виде гистограммы, аналогичной первому этапу моделирования.

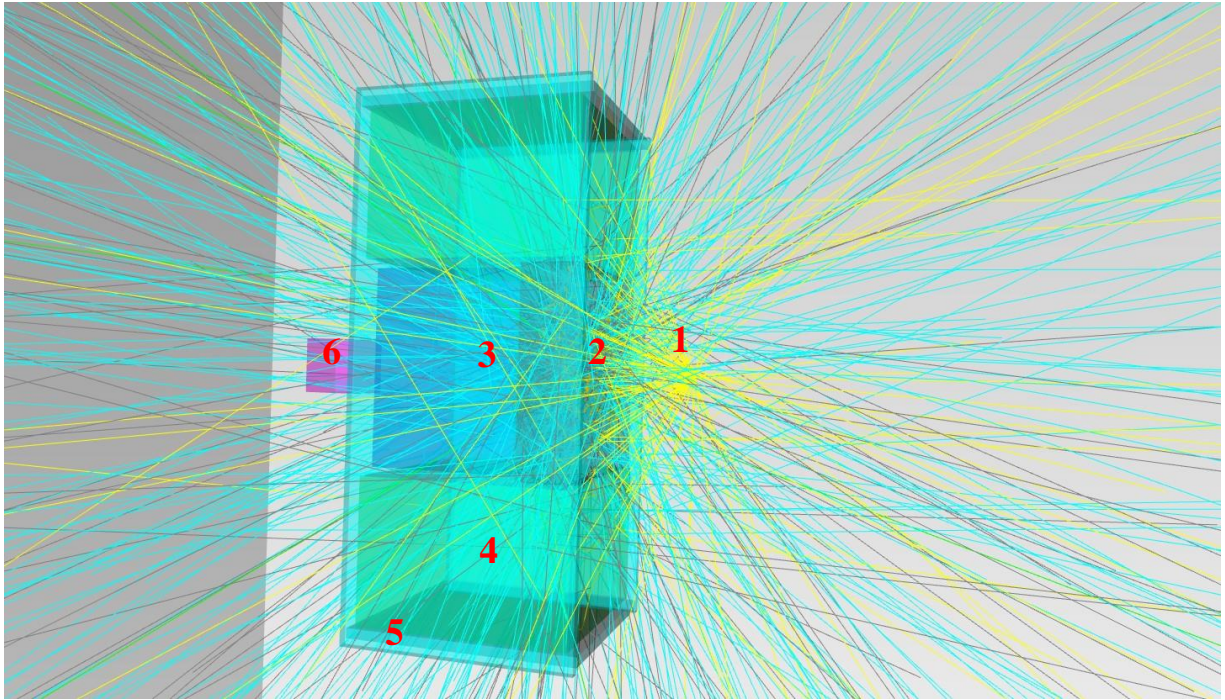
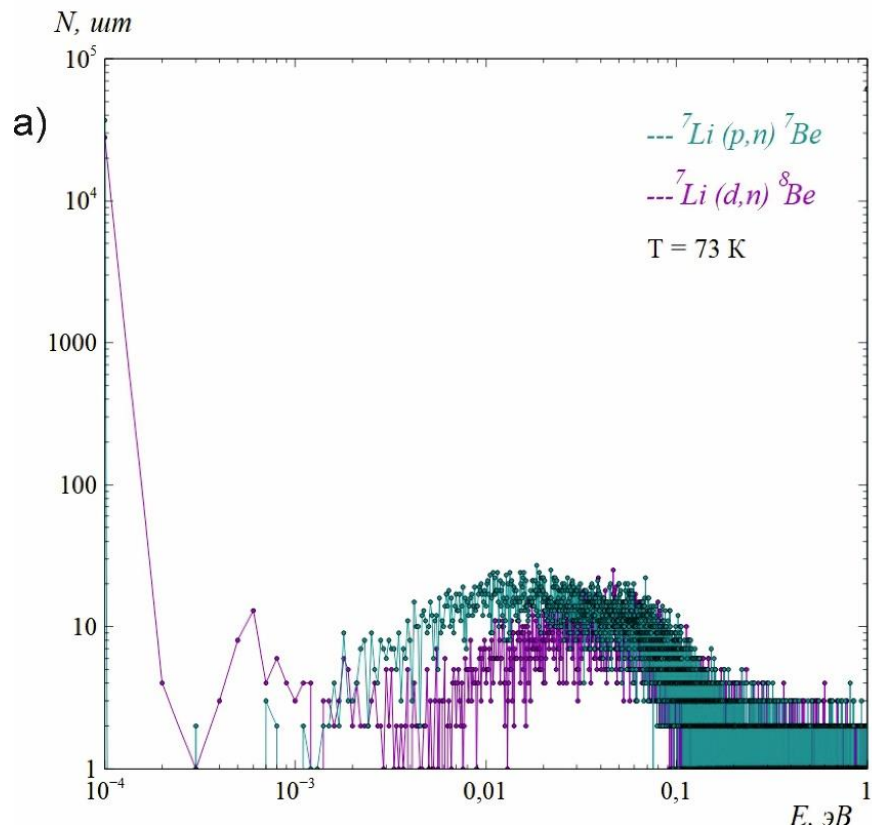


Рисунок 7 - Схема моделирования прохождения нейтронов через систему формирования пучка холодных нейтронов: 1 – источник нейтронов, 2 – оргстекло, 3 – тяжелая вода при 73 К, 4 – бетон, 5 – свинец, 6 – чувствительная область



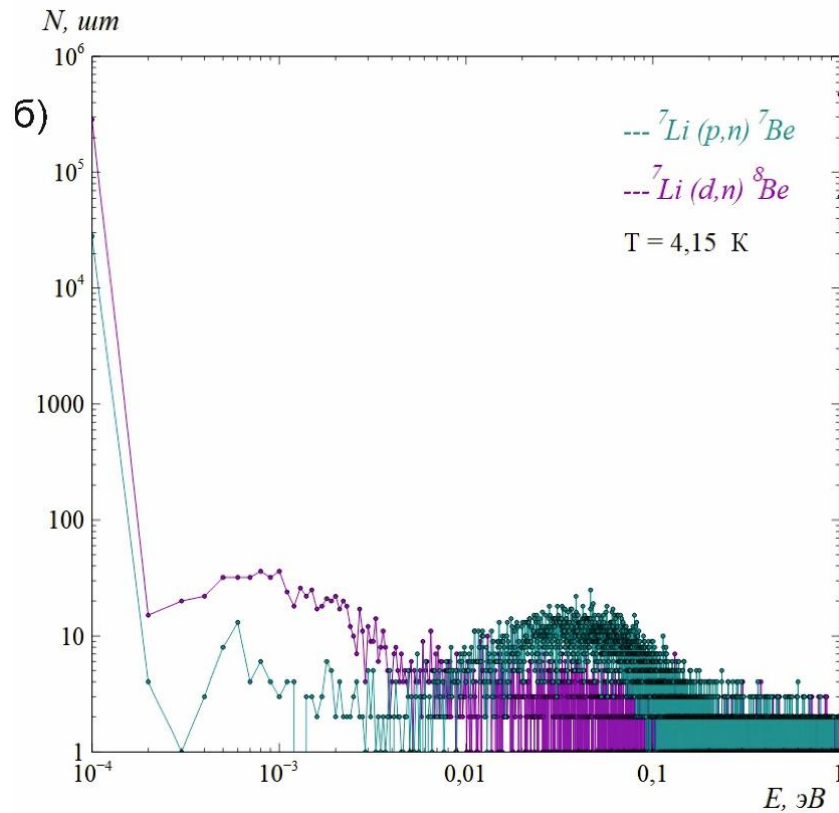


Рисунок 8 - Спектр нейтронов, полученный при моделировании с параметрами: а) замедлитель из тяжелой воды 150 мм при температуре 73 К, кол-во частиц – 10^8 шт; б) замедлитель из тяжелой воды 150 мм при температуре 4,15 К, кол-во частиц – 10^8 шт.

Результаты моделирования прохождения нейтронов через описанную геометрию показаны на рисунке 8. Из графиков видно, что большая часть попавших в чувствительную область нейтронов имели энергию от 0 до 0,001 эВ. Таким образом, моделирование показало эффективность выбранных для системы материалов и возможность получения с ее помощью холодных нейтронов.

4. Описание эксперимента и обсуждение результатов

В ходе работы была проведена серия экспериментов по получению замедленных нейтронов. Ожидается, что при получении холодных нейтронов мы будем фиксировать детектором большее количество нейтронов, чем в случае работы с тепловыми или быстрыми нейтронами. Это связано с тем, что сечение захвата нейтрона бором увеличивается с уменьшением энергии нейтрона (рисунок 9).

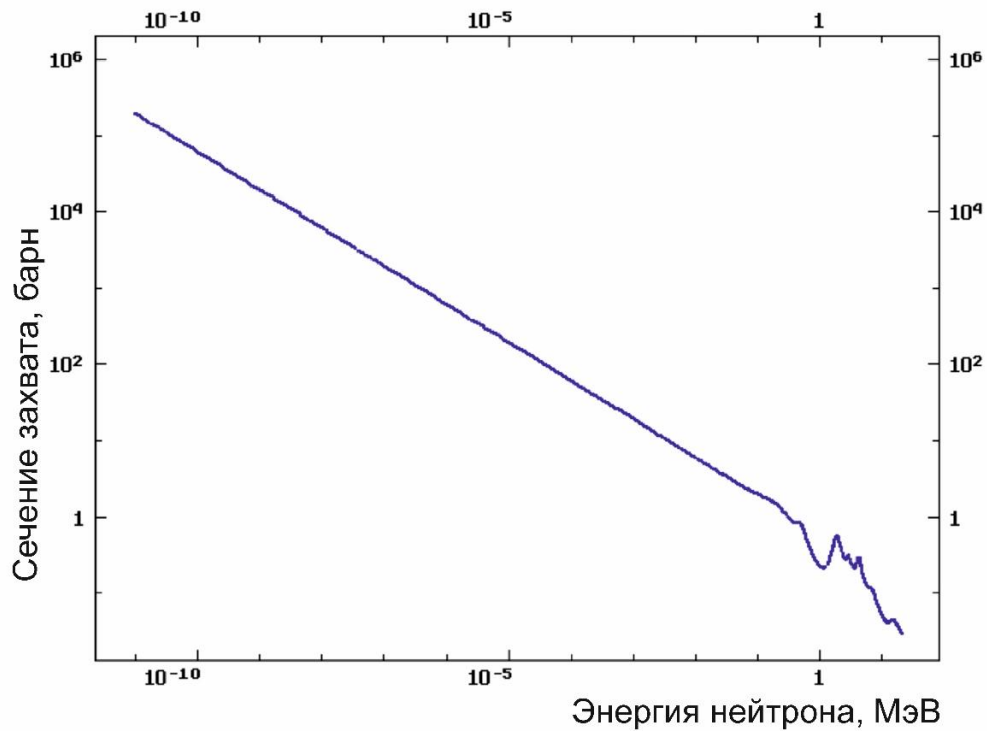


Рисунок 9 – Сечение захвата бором-10 нейтрона

Основной задачей экспериментов является оптимизация параметров СФП, для этого были получены зависимости количества замедленных нейтронов от таких параметров, как длина, материал и температура замедляющей части системы для получения холодных нейтронов. И на основе этих данных оптимизация СФП. Все значения количества нейтронов, приведенные в работе, нормированы на ток протонов, попадающий на литиевую мишень.

4.1 Постановка эксперимента

Для экспериментального подтверждения рассеивающих и замедляющих свойств материалов, выбранных для системы замедления нейтронов, была проведена серия экспериментов. Схема эксперимента представлена на рисунке 10. Пучок протонов с энергией 2050 кэВ, получаемый на ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией, направлялся на литиевую мишень, в ходе реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ генерировались нейтроны, используемые для экспериментов данной работы. Они направлялись на прототип СФП холодных нейтронов и при выходе из нее фиксировались нейтронным счетчиком, обогащенным бором полистирольным сцинтиллятором (ИФВЭ НИЦ КИ, Протвино).

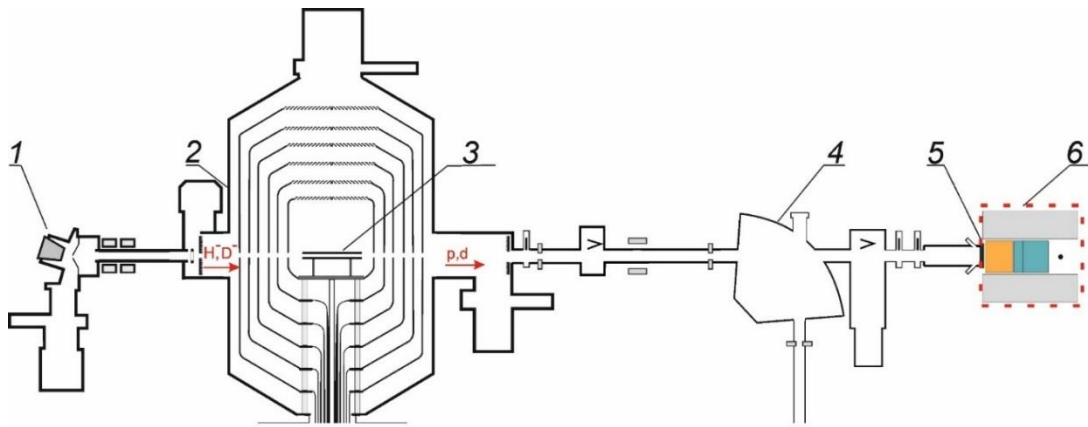


Рисунок 10 - Схема эксперимента: 1 – источник отрицательный ионов водорода, 2 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 3 – обдирочная мишень, 4 – поворотный магнит, 5 – литиевая мишень, 6 – система формирования пучка холодных нейтронов

Прототип СФП состоял из: предзамедлителя из оргстекла для замедления нейтронов до тепловой энергии, холодного замедлителя из воды или тяжелой воды при температуре 73 К, поглотителя из специально изготовленного обогащённого бором бетона. Бетон был выбран как в качестве отражателя, так и в качестве поглотителя, карбид бора с входящим в его состав бором позволил обеспечить безопасность эксперимента так как обладает высоким сечением поглощения нейтронов [Таблица 1]. Оргстекло с химической формулой $[-CH_2C(CH_3)(COOCH_3)-]_n$ является плотной водородосодержащей средой с температурой плавления 433 К и плотностью 1,19 г/см. Оно было выбрано в качестве предзамедлителя для термализации нейтронов так как имеет низкое сечение поглощения и высокое сечение рассеяния нейтронов. Это можно проследить по сечениям взаимодействия входящих в него атомов с нейтроном [Таблица 1]. Фотографии прототипа системы формирования пучка холодных нейтронов показаны на рисунке 11.



Рисунок 11 - Фотографии прототипа системы замедления нейтронов: 1 – литиевая мишень, 2 – бетонные блоки, 3 – пластины оргстекла, 4 – замедлитель из воды/тяжелой воды, 5 – детектор нейтронов

Для создания прототипа системы формирования пучка холодных нейтронов в качестве замедлителей использовались пластины из оргстекла ($C_5O_2N_8$)_n 3 плотность – 1,18 г/см³, диаметр 10 мм, толщина 12 мм) и сосуды объемами 2079 и 4620 см³ (2,079 л и 4,620 л) 5, наполняемые обыкновенной и тяжелой водой комнатной и криогенной (73 К) температуры. Эффективная толщина замедления сосуда – 4,5 и 10 см. Элементы системы были расположены следующим образом: сразу после литиевой мишени 1 располагались пластины из оргстекла, за ними сосуды с водой/тяжелой водой 4. В каждом испытании толщина замедления нейтронов изменялась посредством удаления той или иной части замедлителя. Поочередно удалялись пластины из оргстекла или сосуды с водой. По периметру

замедляющей части в качестве отражателей использовались бетонные блоки 2. Измерения проводились по 90 сек, с двукратным повторением. В результатах указаны усредненные показания детектора. Так, в ходе серии экспериментов, были получены зависимости количества замедленных после термализации нейтронов от длины замедлителя.

4.2 Обсуждение результатов эксперимента

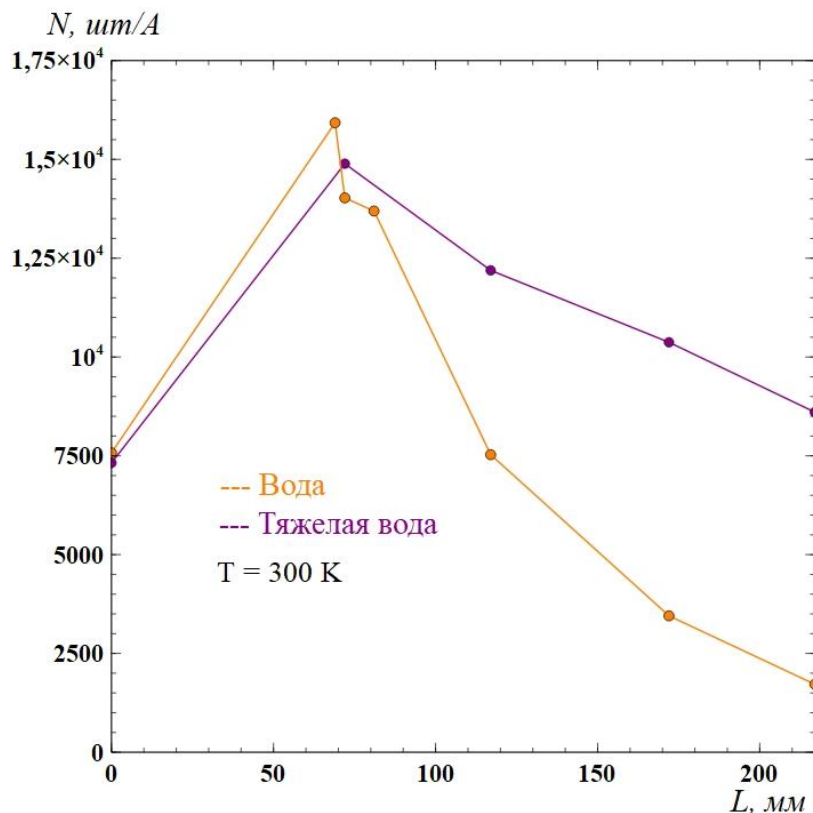


Рисунок 12 - Зависимость регистрируемых нейтронов от длины замедлителя на воде и тяжелой воде при комнатной температуре

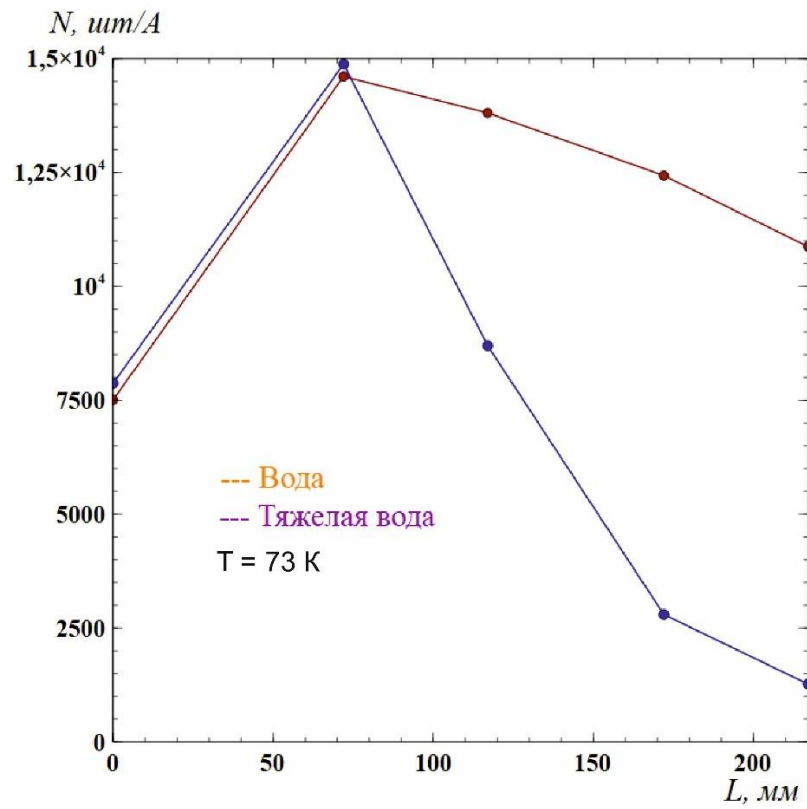


Рисунок 12 - Зависимость регистрируемых нейтронов от длины замедления на воде и тяжелой воде при температуре 73 К

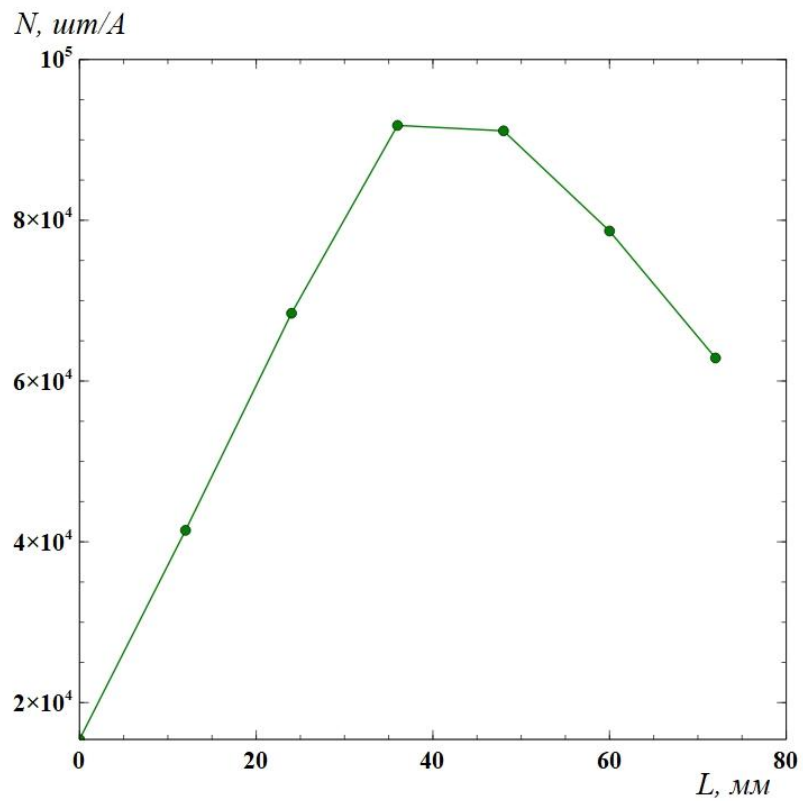


Рисунок 14 - Зависимость регистрируемых нейтронов от длины замедления на оргстекле при комнатной температуре

Графики, изображенные на рисунках 12, 13, отражают зависимость замедления уже термализованных на оргстекле нейтронов: первая точка показывает количество задетектированных нейтронов, прошедших от литиевой мишени без замедлителя. Вторая точка отражает количество нейтронов, прошедших через 72 мм оргстекла. Следующие точки показывают замедление термализованных нейтронов на замедлителе из воды или тяжелой воды.

Как и ожидалось, при увеличении длины замедлителя до оптимального значения растет количество регистрируемых детектором нейтронов, что говорит о потере энергии нейтронами, т.е замедлении.

Из графиков, изображенных на рисунках 12, 14, видно, что в качестве предзамедляющей части системы формирования пучка холодных нейтронов можно эффективно использовать 45 мм воды или 36 мм оргстекла при комнатной температуре. В результате замедления термализованных нейтронов на 145 мм теплого замедлителя было потеряно 89 % нейтронов на воде и 48 % на тяжелой воде. В случае холодного замедлителя – 84 % на воде и 26 % на тяжелой воде. Плавный спад количества регистрируемых нейтронов при увеличении длины замедлителя из тяжелой воды говорит о том, что тяжелая вода почти не поглощает нейтроны. Таким образом, тяжёлая вода при температуре 73 К и ниже является оптимальным замедлителем нейтронов теплового диапазона энергий [Таблица 3].

Таблица 3 Результаты эксперимента по замедлению нейтронов, анализ графиков 12,13

	6D нейтроны, шт	6D+45 нейтроны, шт	6D+100 нейтроны, шт	6D+145 нейтроны, шт
Тепловой диапазон температур (без замедлителя фиксировалось 7450 шт нейтронов)				
Вода	13693 (100 %)	7529 (47 %)	3451 (22 %)	1720 (11 %)
Тяжелая вода	14891 (100 %)	12192 (82 %)	10372 (70 %)	8605 (58 %)
Диапазон криотемператур (без замедлителя фиксировалось 7690 шт нейтронов)				
Вода	14880 (100 %)	8697 (58 %)	2797 (19 %)	1217 (16 %)
Тяжелая вода	14610 (100 %)	13807 (95 %)	12433 (85 %)	10874 (74 %)

Заключение

В ходе выполнения работы был проведен системный анализ литературы, соответствующей теме работы. Разработана система формирования пучка холодных нейтронов, состоящая из следующих элементов: предзамедлителя для термализации нейтронов, холодного замедлителя, отражателей, элементов ограничивающих прохождение гамма-квантов от системы. Предложены материалы для каждого элемента системы, выполнены оценки длины замедлителей. Проведено моделирование прохождения нейтронов, генерируемых на ускорительном источнике нейтронов, через систему формирования пучка холодных нейтронов. Для этого было изучено программное обеспечение Geant4 и предварительно промоделировано прохождение нейтронов через тяжелую воду при комнатной температуре и температуре 73 К для подтверждения возможностей Geant4 работать с материалами с низкой температурой. Проведены эксперименты, направленные на получение холодных нейтронов, в результате которых согласно расчетам получены холодные нейтроны, подтверждена гипотеза о том, что тяжелая вода при температуре 73 К является оптимальным замедлителем нейтронов для дальнейших испытаний.

Список литературы

1. Брюханова Ю.А., Дашков И.Д., Дьячков И.С., Каплун С.В., Кэбин Э.И., Ланской Д.Е., Рогатнев С.С., Сидоров С.В., Третьякова Т.Ю., Федоров Н.А., Фурсова Н.Ю., Чашин С.М., Шоркин Р.А., Нейтрон, М.; КДУ 2021, 156 с.
2. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. 4-е изд., М.: Атомиздат, 1979, 288 с.
3. Бекурц К., Виртц К., Нейтронная физика, М.: АТОМИЗДАТ 1968, 457 с.
4. Куликов С.А., Шабалин Е.П., Сравнение эффективности материалов холодных замедлителей нейтронов для реактора ИБР-2М, Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна: 2005, 11 стр.
5. Митюхляев В.А., Создание источников холодных нейтронов и ультрахолодных нейтронов для нейтронных исследований, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, СПб:2010, 171 с.
6. Irisali Khidirov, Xinzhe Jin, Neutron diffraction. Principles, Instrumentation and application, Ibaraki, Japan: 2013, 79 с.
7. Таскаев С.Ю., Бор-нейтронозахватная терапия злокачественных опухолей: основы, история и текущее состояние, Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия, том 2, Новосибирск: 2019, №2, с. 66-83.
8. Коник П.И., Нейтроноводная система реактора ПИК, диссертация на соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук, Гатчина: 2020, 118 с.
9. Касатов Д. А., Кошкарев А. М., Макаров А. Н., Остреинов Г. М., Таскаев С. Ю., Щудло И. М., Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени, Новосибирск: Приборы и техника эксперимента, 2020, № 5, с. 5–9
10. Porosev V., Savinov G, Evaluation of boron-enriched plastic scintillator for thermal neutron detection. JINST, 14, 2019.

- 11.Макаров А. Н., Измерение спектра эпитепловых нейтронов ускорительного источника времяпролетным методом, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Новосибирск: 2015, 109 с.
- 12.Reifarth R., Heil M., F. Kappeler F., Plag R., PINO—a tool for simulating neutron spectra resulting from the ${}^7\text{Li}(p,n)$ reaction, Germany: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 608, 2009, 139-143
- 13.Бекман И.Н., Ядерная физика лекция 19 Ядерные реакции в реакторе, М.; 25 с.
- 14.Mocko M., Daemen L.L., Hartl M.A., Huegle Th., Muhrer G., Experimental study of potential neutron moderator materials, USA, Los Alamos,: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2010, 173-179
- 15.Магомедбеков Э. П., Баранов С. В, Белкин Д. Ю, Розенкевич М. Б., Растунова И. Л., Тяжелая вода – свойства, получение и применение в ядерной отрасли, М., Озерск: Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. INISM'14: Сборник докладов Пятой Международной конференции и Девятой Международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова, 2015, 39-56
- 16.Geant4 Collaboration, Book for application developers: 2022, 479 с.
- 17.Geant4 Collaboration, Physics Reference Manual: 2022, 458 с.