

“МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра Электрофизических установок и ускорителей

Утверждаю

Зав. кафедрой

А. В. Бурдаков

« » 2023 г.

НАУЧНО - КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по направлению высшего образования

Специальность 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Энхцэцэг Бямбацэрэн

**НЕЙТРОННЫЕ И ГАММА ПОЛЯ В ФАНТОМЕ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ
МЕТОДА БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ**

**Научный
руководитель**

Бурдаков Александр Владимирович
доктор физико-математических наук,
профессор

**Автор научно –
квалификационной работы**

Бямбацэрэн Энхцэцэг
аспирант Физико-технического
факультета

Новосибирск 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 БОР - НЕЙТРОНОЗАХВАТНАЯ ТЕРАПИЯ	9
1.1 Основы бор – нейтронозахватной терапии	9
1.2 Ускоритель –тандем с вакуумной изоляцией	12
1.3 Реакции генерации нейтронов	16
1.4 Литиевая нейтроногенерирующая мишень.....	18
1.5 Система формирования пучка нейтронов	24
ГЛАВА 2 ВАЛИДАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА ПОТОКА ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИИ $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$	
2.1 Проектирование детектора	28
2.2 Моделирование чувствительности детектора	29
2.3 Экспериментальная валидация	32
2.4 Улучшение детектора	33
2.5 Выводы	35
ГЛАВА 3 ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА – ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОДНОМ ФАНТОМЕ	
3.1 Источник нейтронов	36
3.2 Материал	37
3.3 Система формирования пучка нейтронов	38
3.4 Эксперимент водного фантома	38
3.5 Определение мощность дозы нейтронов и гамма излучения	39
3.6 Результаты и обсуждения	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	56

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Целесообразность развития наукоемкой и дорогостоящей технологии БНЗТ связана с тем, что она ориентирована на лечение таких видов злокачественных опухолей, как глиобластомы мозга, анапластические астроцитомы или метастазы меланомы, которые практически не поддаются никаким другим методам терапии. При этом ставка делалась на эпитепловые нейтроны, которые, замедляясь до тепловых энергий в тканях черепа и мозга, обеспечивали максимум терапевтической дозы в опухоли. Так использование БНЗТ при лечении опухолей мозга позволило достигнуть 55% 5-летней выживаемости против 1..2% при обычной лучевой терапии. Соответствующие фармпрепараты, введенные в организм пациента, разносятся током крови по телу и накапливаются в пораженных тканях или органах, создавая высокую концентрацию изотопа ^{10}B в опухоли (10^9 атомов в клетке), что в несколько раз больше, чем в здоровой ткани. Это обеспечивает возможность избирательного поражения раковой опухоли[1]. Испускаемые заряженные частицы в результате реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ имеют энергию около 1МэВ, что означает что диапазон составляет $\approx 10\text{мкм}$ в тканях.

В последние годы чтобы избежать хирургического риска с большим энтузиазмом разрабатывается методика БНЗТ, где необходим пучок эпитепловых нейтронов (0,5 эВ-10кэВ). Пучки эпитепловых нейтронов с достаточной интенсивностей для лечения пациентов в настоящее время могут быть получены в ядерных реакторах. В этих пучках отсутствуют тепловые нейтроны, они возникают внутри ткани в результате термализации эпитепловых нейтронов. Для успешной реализации возможностей БНЗТ следует учитывать взаимодействие тепловых нейтронов с химическими элементами, составляющими тело человека. В основном это водород, кислород, углерод и азот. В частности, ядерные реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ и $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ приводят к появлению ядер отдачи и γ – квантов. Экспериментальные дозиметрические сцинтилляционные датчиковые данные, полученные в нормальных условиях является задачей создания необходимы для измерения распределения нейтронов и гамма – излучения и проверки расчетов планирования лечения. Последнее время в

теоретическом исследовании наиболее оптимальный материал фантома ткани головного мозга был определен для БНЗТ с использованием методов Монте – Карло .

Степень разработанности темы исследования

Для выполнения темы исследований нейтронные и гамма поля были разработаны и изготовлены прокалиброваны активационные детекторы на основе галлиевой фольги . Кроме того были использованы сцинтилляционные детекторы на основе полистирола SC-331 , обогащенный бором , SC-301 без бора. Пластиковые сцинтилляторы на основе полистирола SC-331 , обогащенный бором , SC-301 без бора разрабатывают в начале 2000 -х годов в Институте Физики Высоких Энергий . Основное требование к сцинтилляционному детектору - обеспечить значительно более высокой концентрации бора-10 в материале сцинтиллятора и высокую временную разрешающую способность сцинтилляционных счетчиков или малое мертвое время счетчиков с тем , чтобы с применением замедлителя , отражателя и фильтров , сформировать пучок эпитепловых нейтронов пригодный для проведения пространственного распределения нейтронов и гамма – излучения в водном фантоме. Последнее время стала разработкой внедрение новая технология , высокопрозрачные сцинтилляционные полоски экструдированные из крупноблочных сцинтилляторов.

Цель и задачи работы

Целью исследования является измерение пространственного распределения нейтронов и гамма – излучения в водном фантоме на источнике нейтронов на основе ускорителя в Институте Ядерной физики им Будкера СОРАН . Для этой цели разработан активационный детектор на основе галлиевой фольги . Кроме того был использован на основе пластиковых сцинтилляторов для измерения дозного поля нейтронов и гамма – излучения в водном фантоме . Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи :

- 1 . Применять водный фантом из поликарбоната толщиной 8мм , заполненный водой для моделирования человеческой головы.
2. Разработать активационный детектор на основе галлиевой фольги для измерения потока эпитепловых нейтронов .
3. Получить результаты измерения мощности дозы нейтронов и гамма – излучения для замедлителя с MgF_2 .

4. Показать корреляцию мощности дозы гамма – излучения измерений двух датчиков .

5. Определить мощность дозы нейтронов и гамма – излучения для замедлителя с оргстеклом и остальную активность и мощность дозы системы формирования пучка .

6. Измерить распределения нейтронов и гамма – излучения по глубине фантома $Z(0,130)$ при разных энергиях с использованием фторида магния , бор – содержащих датчиков.

7. Получить рассчитанные результаты методом моделирования переноса нейтронов Монте- Карло по сравнению с экспериментальным данным значением .

Объект и предмет исследования

Объект исследования являются конструкционные материалы и водный фантом , детекторы , изготовленные из пластикового сцинтиллятора на основе полистирола : SC331 сцинтиллятор , обогащенный бором , SC-301 без бора и система формирования пучка нейтронов .

Предмет исследования - в нашей работе распределение нейтронного и гамма дозного поля в водном фантоме экспериментально исследуется с целью предложение водного фантома для дозиметрии БНЗТ и сцинтилляционные детекторы .

Теоретическая и методологическая основы исследования

Методологической основой исследования являются экспериментальные методы исследования включая численное моделирование различия между смоделированной чувствительностью детектора и чувствительностью ранее предложенного и экспериментальное исследование спектров нейтронов и гамма – излучения при облучении тепловыми нейтронами и применение метода Монте – Карло моделирования переноса нейтронов по сравнению с экспериментальным значением .

Материалы исследования : могут быть использованы для создания источников моноэнергетических нейтронов и избежания нежелательного загрязнения пучка быстрых нейтронов , тепловых нейтронов и γ - квантов с целью применения для клинических исследований бор -нейтронозахватной терапии , исследований спектров γ и нейтронного излучений .

Обоснованность достоверность и апробация результатов исследования
Достоверность полученных результатов экспериментальными подтверждается их

сравнением с определенными результатами численного моделирования переноса нейтронов .

Работы , составляющие материал диссертации , докладывались автором и обсуждались на 4 – ой Все российской школе молодых ученых БНЗТ (Новосибирск 2022) , на конференции молодых исследователей в области бор - нейтронозахватной терапии (Китай 2022). По теме диссертации опубликовано 2 статьи и 2 в трудах конференции .

Научная новизна работы

Цилиндрический активационный детектор с использованием реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ для измерения плотности потока нейтронов в эпитепловом диапазоне энергий предложен и оптимизирован методом моделирования Монте – Карло . Также предложено оснастить детектор титановым рассеивателем , уменьшающим чувствительность детектора к быстрым нейтронам. С высокой точностью измерена мощность дозы нейтронов и гамма – излучения вдоль оси X (-110,120) на разных расстояниях Z (10,40, 90, 130) от стенки фантомной поверхности при энергии протонного пучка 2,07 МэВ и протонном токе 1,3мА. Впервые измерены разниц (B_{γ} - C_{γ}) в подсчете дозы нейтронов и гамма – излучения вдоль оси глубины фантома Z (0,130) по удалению от стенки фантома в центре мишени при протонном токе 1,8 мА. Впервые нейтронный и гамма счётчик на основе полистирольного сцинтиллятора был откалиброван по мощности дозы с применением дозиметра ДБГ.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость исследования состоит в том , что приобретены новые знания распределений нейтронных и гамма полей в фантоме человека.

Практическая значимость научной работы состоит в том , что получены новые знания о валидации детектора с использованием реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ для восстановления плотности потока эпитепловых нейтронов и о возможных причинах различия значений эффективности детектора , о исследовании спектров нейтронов и гамма –излучения в водном фантоме с помощью борсодержащих датчиков а именно :

1. Приведены что поток эпитепловых нейтронов пучка нейтронов БНЗТ , чувствительности цилиндрического активационного детектора с титановым слоем и оригинального детектора .

2. Измерена эмиссия γ - квантов с энергией 834 кэВ, создаваемый в результате мгновенной ядерной реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$.

3. Проведено измерения распределения нейтронов и гамма –излучения при разных энергиях 2,1МэВ и 2,2 МэВ с использованием фторида магния и бор – содержащих датчиков .

Полученные данные применены при разработке галлиевого детектора для отдела устойчивой энергетики и инженерной защиты окружающей среды высшей инженерной школы университета Осаки в Японии.

Основные положения , выносимые на защиту

1. Показано , что разработанный активационный детектор способен выделять эпитепловую часть спектра нейтронов, генерируемого в реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma) ^{72}\text{Ga}$. Измерены активность ^{72}Ga ядра галлия , образующегося в реакции захвата нейтронов $^{71}\text{Ga}(n,\gamma) ^{72}\text{Ga}$ и спектр γ - излучения происходящей в процессе мгновенной ядерной реакции .Установлено что чувствительность детектора, усредненная в энергетическом диапазоне от 1 эВ до 10 кэВ, составила $\eta = (7.7 \pm 0.9) 10^{-4}$ (н/см²) .

2. Установлено ,что мощность дозы нейтронов и гамма- излучения зависит от расстояния оси X(-110,120) в фантоме . Мощность дозы максимальная нормированная нейтронов достигается на глубине 10мм в водном фантоме . Измерено распределение дозы по глубине для нейтронов и гамма-излучения . Тепловые нейтроны , создающие радиационное поле с максимумом нейтронной дозы на глубине 10мм , затем экспоненциально падает.

3. Мощность дозы нейтронов для замедлителя с оргстеклом значительно падает с увеличением глубины Z уменьшается с 4,09 до 0,44 Зв/ч/мА в диапазоне 10-80мм.

4. Мощность дозы нейтронов и γ - излучения при энергии протонов 2,2 МэВ составляет по сравнению с энергией 2,1 МэВ в 1,5 раза больше .

5. Определены расчетные результаты программой NMC моделирования переноса нейтронов методом Монте- Карло по сравнению с экспериментальным данным значением .

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежающих в основе доклада является определяющим. При определяющим участии автора разработан и сделан цилиндрический активационный детектор для определения потока эпитепловых нейтронов . При определяющем участии автора размещены два прототипа детекторов, в системы формирования пучка нейтронов установлены

замедлители нейтронов из оргстекла , специальные узлы , подключаемые к ускорителю – тандему с вакуумной изоляцией для изучения оптимизация и валидации галлиевого детектора . Автором лично освоены и применены сцинтилляционные детекторы для исследовании спектров γ -квантов и нейтронного излучения . Автором лично получены и проанализированы экспериментальные и численные моделирования результаты при изучении сравнение чувствительностей детектора без титанового диска и с титановым диском и потока эпитепловых нейтронов при измерении активность γ - излучения , возникающего при захвате нейтронов в фольге галлия . Автором написаны соответствующие разделы в опубликованных статьях .

Структура и объем научно – квалификационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, и изложена на 57 страницах, включая 38 иллюстрации и 4 таблиц, и содержит 2 наименование библиографии.

ГЛАВА 1 БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНАЯ ТЕРАПИЯ

В Главе 1 приведены основы бор-нейтронозахватной терапии, этапы истории развития представлены состоянием разработки и применения источника тепловых нейтронов на основе ускорителя – тандема с вакуумной изоляцией и литиевой нейтроногенерирующей мишени, показана система формирования пучка нейтронов для получения лучшей по качеству терапевтической пучок нейтронов и мощности дозы глубины терапии и терапевтического отношения [2].

1.1 Основы бор – нейтронозахватной терапии

Бор – нейтронозахватная терапия является формой бинарной радиотерапии, использующей высокую способность нерадиоактивного ядра бора-10 захватывать тепловой нейтрон. Сечение реакции поглощения нейтрона с последующим, практически мгновенным распадом образованного в возбужденном состоянии ядра бора-11 на α частицу и ядро лития-7 приведено на рисунке 1. Сечение этой реакции, записываемой как $B^{10}(n,\alpha)^7Li$, составляет величину 3835 б для теплового нейтрона и уменьшается обратно пропорционально с увеличением скорости нейтрона [2]. Такая величина сечения действительно является большой – достаточно обратить внимание на представленный на этом рисунке график сечения упругого рассеяния нейтрона на ядре бора – 10. Оно практически не зависит от энергии нейтрона и во много раз меньше – всего в районе 2б.

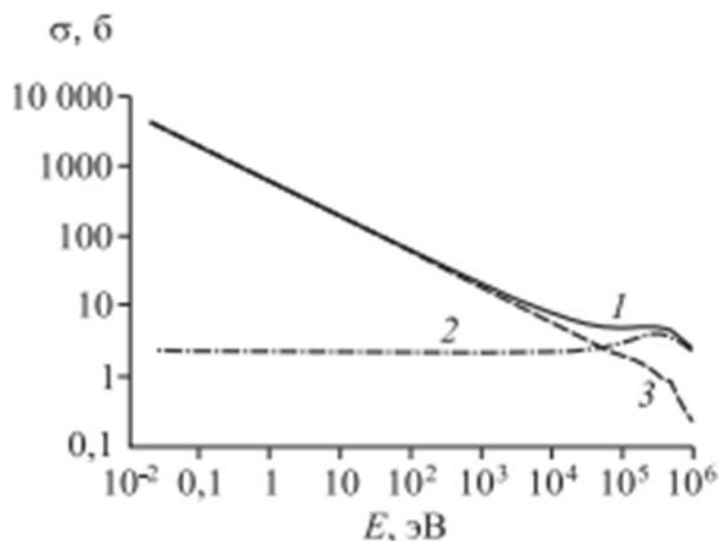


Рисунок 1. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтрона с ядром бора – ^{10}B (1), σ , в том числе упругого рассеяния (2) и реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ (3) от энергии E нейтрона [2]

Одно из таких связанных состояний, реализуется при взаимодействии нейтрона с ядром ^{10}B – оно приводит к поглощению нейтрона ядром бора с огромной вероятностью. Схема основной ядерной реакции бор-нейтронозахватной терапии приведена на рисунке 2. Поглощение нейтрона ядром ^{10}B приводит к мгновенной ядерной реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ с выделением энергии 2,79 МэВ. В 6,1% случаев энергия распределяется только между ядром лития и α – частицей, в 93,9% случаев ядро лития вылетает в возбужденном состоянии и испускает γ квант с энергией 0,48 МэВ. Продукты ядерной реакции, ядро лития с энергией 0,84 МэВ и α частица с энергией 1,47 МэВ характеризуются высоким темпом торможения средние значения 162 и 196 кэВ·мкм⁻¹ соответственно и малым пробегом этих частиц в воде или в ткани организма – 5,2 и 7,5 мкм (характерный размер клеток млекопитающих). Продукты этой реакции имеют высокую характеристику передачи линейной энергии (α – частица примерно 150 кэВ $\mu\text{м}^{-1}$), ^7Li – ядро примерно 175 кэВ $\mu\text{м}^{-1}$. Длина пробега этих частиц в воде и ткани в диапазоне 4,5 -10 мкм. Поэтому теоретически можно селективно облучать эти опухолевые клетки, которые захватили достаточное количество ^{10}B и в то же время спасают нормальные клетки [3].

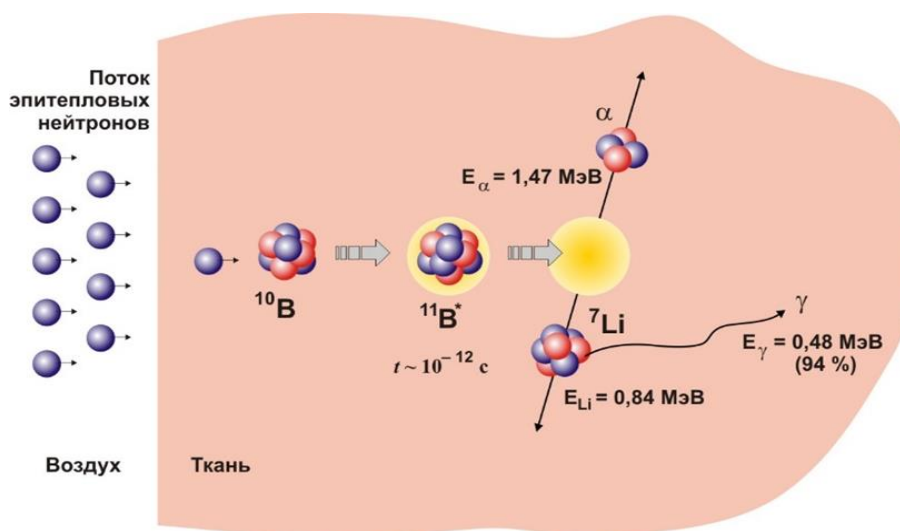


Рисунок 2. Схема основной ядерной реакции бор-нейтронозахватной терапии [3]

Следовательно, выделение основной части энергии ядерной реакции $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$, а именно 84%, ограничивается размером одной клетки. Таким образом, селективное накопление бора-10 внутри клеток опухоли и последующее ее облучение нейтронами должны приводить к разрушению клеток опухоли с относительно малыми повреждениями окружающих здоровых клеток. Вскоре после открытия нейтрона Чедвиком в 1932 г и описания $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ реакции Тэйлором и Голдхабером основная идея использования нейтронозахватных реакций в лечении рака была опубликована Лочером в 1936 г. В частности, существует возможность введения малых количеств сильного нейтронного поглощения в область, где требуется высвободить энергию ионизации. Простой иллюстрацией будет инъекция растворимого нетоксичного компаунда бора, лития, гадолиния или золота в поверхностный рак с последующей бомбардировкой медленными нейтронами.

Крюгер опубликовал первые эксперименты на БНЗТ в 1940 году. Он лечил фрагменты опухоли в пробирке с борной кислотой и нейтронным облучением. После имплантации мышам эти опухоли показали более низкую эффективность трансплантации по сравнению с контролем, в котором они были обработаны только борной кислотой или тепловыми нейтронами соответственно. В том же году Заил и Соавт исследовали эффективность БНЗТ в естественных условиях после инъекции борной кислоты или бора в масляной суспензии при саркоме мышцы. Очень скоро было предложено лечение опухолей головного мозга с помощью БНЗТ в которой было предложено селективное поглощение компаунды бора в опухоли. Тогда как нормальный мозг был бы защищен. Более высокие концентрации бора в опухолях головного мозга,

чем в нормальном мозге были продемонстрированы на людях . Через десять лет ранних биологических экспериментов были выполнены первые клинические применения на людях.

Историю клинических применений БНЗТ можно поразделить в четырех разделах .

1. Ранние клинические испытания в США с 1951 по 1961 г.
2. Новаторская работа Хатанака и других в Японии с 1968 до конца 1980 х годов .
3. Период ранних перспективных клинических испытаний , начавшийся с середины 1990-х годов и продолжающийся до сих пор .
4. И, наконец , использование ускорителей на основе эпитепловых нейтронов , которые начинаются сегодня.

1.2 Ускоритель –тандем с вакуумной изоляцией

Так в 1998 г .родился новын тип ускорителя заряженных частиц – ускоритель тандем с вакуумной изоляцией . Как и в любом другом тандемном ускорителе , сначала осуществляется ускорение отрицательных ионов , затем после их обдирки внутри высоковольтного электрода ускорение , тем же потенциалом уже положительных ионов. Однако в предложенном ускорителе – тандеме с вакуумной изоляцией традиционные ускорительные трубки , набор кольцевых изоляторов и электродов как таковые отсутствуют – изолятор на котором крепятся электроды, отнесен от тракта ускорения пучка на значительное расстояние. При такой геометрии электроды в ускорительном канале могут быть расположены ближе, чем в ускорительной трубке, поскольку напряженность электрического поля в вакуумном зазоре выше, чем на поверхности изолятора . Эти новшества позволяют обеспечить больший темп ускорения ионов и вместе с откачкой газа через жалюзи электродов вне ускорительного промежутка надеяться на получение сильноточного протонного пучка. На рисунке 3 и 4, представлены схема и внешний вид ускорителя – тандема с вакуумной изоляцией.

Для генерации отрицательных ионов водорода применяется поверхностно – плазменный источник 5 использующий пеннинговский разряд с полыми катодами. Выходящий из источника пучок отрицательных ионов водорода с током до 6 мА и энергией до 23 кэВ поворачивается в магнитном поле на угол 15° фокусируется парой

магнитных линз , инжектируется в ускоритель и ускоряется в нем до 1 МВ. В газовой обдирочной мишени 6 , установленной внутри высоковольтного электрода 4, отрицательные ионы водорода превращаются в протоны , которые затем же потенциалом 1 МВ ускоряются до энергии 2МэВ и транспортируются до нейтроногенерирующей мишени. В тракте транспортировки пучка высокой энергии установлены две пары квадрупольных линз с градиентом магнитного поля до 400 Гс/см при длине поля 20 см , поворотный 90^0 магнит с радиусом поворота 45см , напряженностью магнитного поля ~ 3 кГс и показателем спада 0,5 и система магнитной развертки, осуществляющая развертку пучка по мишени однородным магнитным полем с напряженностью до 500 Гс на длине ~ 20 см , вращающимся с частотой 100 – 2000 Гц.

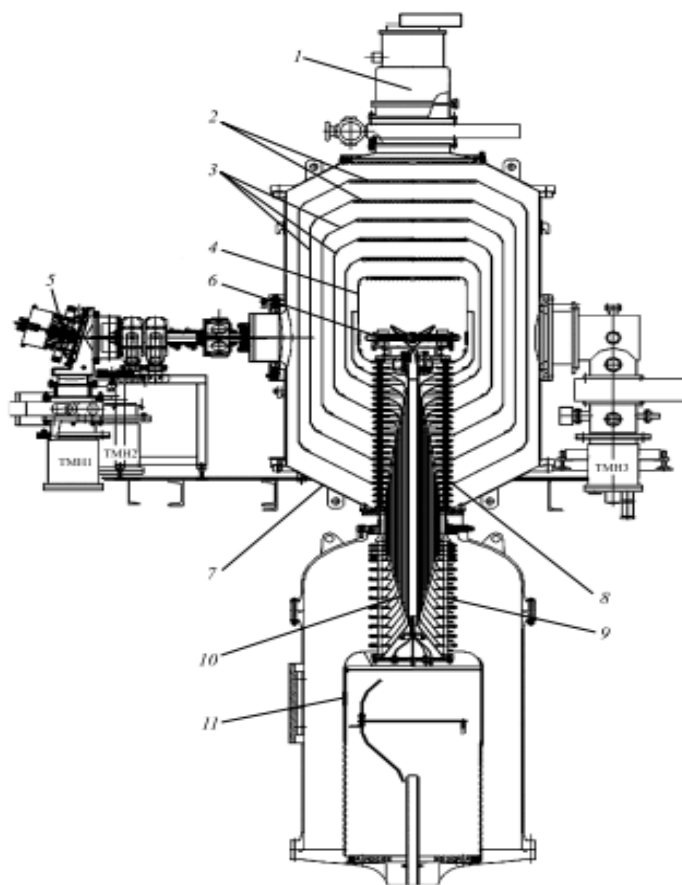


Рисунок 3. Ускорителя – тандема с вакуумной изоляцией 1- криогенный насос , 2 - жалюзи электродов – экранов , 3 – промежуточные электроды –экраны , 4 – высоковольтный электрод , 5 - источник отрицательных ионов водорода , 6 - газовая перезарядная мишень , 7- вакуумный бак , 8- вакуумная часть проходного изолятора , 9- газовая часть проходного изолятора , 10- внутренние коаксиальные цилиндры , соединяющие электроды одинакового потенциала газовой и вакуумной частей изолятора , 11- источник высокого напряжения [2]

Потенциал на высоковольтный электрод 4 и на пять промежуточных электродов ускорителя 3 подается от высоковольтного источника напряжения 11 (большая часть не показана.) через проходные изоляторы 8 и 9 , в которых установлен омический делитель.

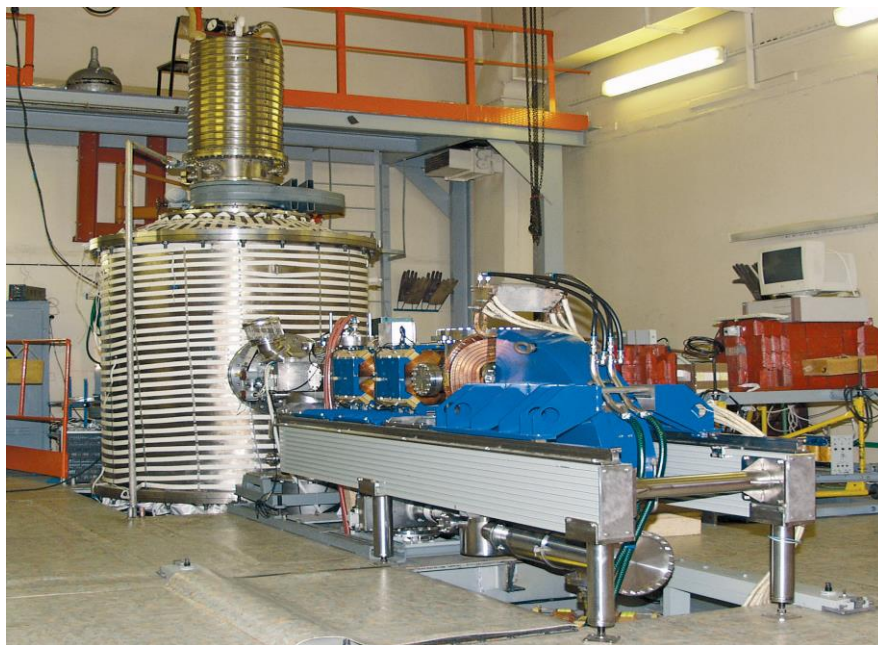


Рисунок 4. Фотография ускорителя - тандема с вакуумной изоляцией [2]

В качестве высоковольтного источника напряжения используется секционированный выпрямитель промышленного ускорителя электронов серии ЭЛВ, разработанного и производимого в ИЯФ СОРАН. Откачка газа осуществляется турбомолекулярными насосами, установленными у источника ионов и на выходе ускорителя, и криогенным насосом 1 через жалюзи электродов 2. Диаметр вакуумного бака ускорителя равен 1400 мм, высоковольтного электрода – 600 мм.

Ускоритель отличается высоким темпом ускорения заряженных частиц наличием двух специфических проблем. Первая специфическая проблема заключается в том, что из-за большой площади электродов большая по величине энергия запасена в ускоряющих зазорах. Поскольку было известно, что пробой с выделяемой энергией более 1Дж приводят к падению высоковольтной прочности миллиметровых вакуумных зазоров то была дополнительно изучена высоковольтная прочность сантиметровых вакуумных зазоров. Выяснено, что пробой с запасенной энергией до 50Дж не снижают высоковольтной прочности 45мм зазора, вплоть до напряженности электрического поля

60кВ/см величина темнового тока приемлемо мала . Эти выводы совместно с результатами рассмотрения динамики пробоев высоковольтных элементов послужили основой проектирования ускорителя с запасенной энергией в зазоре до 30Дж и напряженностью 25 кВ /см . В результате проведенной позазорной тренировки с помощью специально изготовленного устройства получено требуемое напряжение ускорителя 1 МВ. Вторая специфическая проблема ускорителя заключается в быстром темпе ускорения ионов, из-за чего входная электростатическая линза ускорителя сильная. Требовалось инжектируемый пучок отрицательных ионов водорода с энергией 21кэВ перефокусировать перед входной линзой ускорителя , чтобы потом ускорять его с темпом 25кэВ/см в узком ускорительном канале. Рассматривая различные способы инъекции ионного пучка в ускоритель при проектировании ионно- оптического тракта было выбрано решение использовать магнитные линзы.

Для изучения инъекции изготовлен многоканальный детектор пучка , который был установлен перед входным отверстием первого ускоряющего электрода ускорителя (рисунок 5). Проведенные измерения зависимости профиля тока пучка от тока магнитных линз позволили определить поперечную температуру ионов на плазменной границе источника – примерно 1 эВ , и выяснить , что в транспортном канале происходит полная компенсация пространственного заряда. При проектировании ускорителя рассматривались также разные виды обдирочных мишеней и для реализации выбрана газовая . Она выполнена в виде охлаждаемой медной трубки длиной 400мм с внутренним диаметром отверстия 16мм с напуском аргона посередине и установлена внутри высоковольтного электрода на проходной изолятор .

Подача газа в мишень осуществляется от 5 – литрового баллона ,размещенного в высоковольтном электроде источника питания, через буферный объем, поступление газа в который регулируется частотой открывания электромеханического клапана. Из буферного объема газ через прецизионный игольчатый натекагель поступает в обдирочную мишень по трубке длиной 2м с внутренним диаметром 4мм , расположенной внутри проходного изолятора .

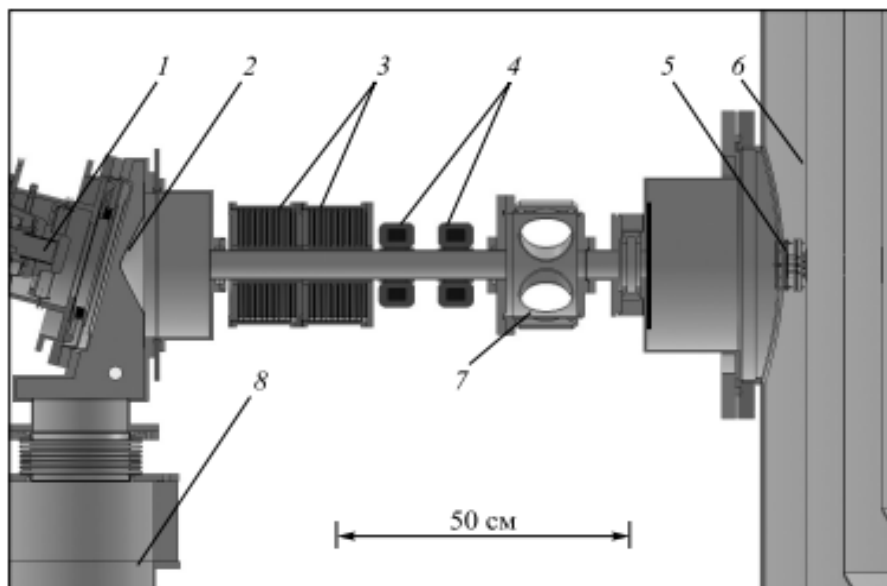


Рисунок 5. - Схема эксперимента 1- Источник отрицательных ионов водорода, 2 – конусная диафрагма, 3 – фокусирующие магнитные линзы, 4 – корректор, 5 – детектор пучка, 6 – первый электрод ускорителя, 7 - диагностическая камера, 8 - турбомолекулярный насос [2]

Характерное время вытекания газа составляет 500с.

1.3 Реакции генерации нейтронов

Для получения нейтронов с помощью пучков заряженных частиц обычно используют ядерные реакции, в которых участвуют ядра со слабосвязанными нейтронами. С энергетической точки зрения есть 2 типа реакции. Экзотермические не требуют минимальной кинетической энергии частиц. Типичным примером является d-d реакция, в результате которой образуются тритий и нейтрон. Энергетический выход реакции составляет 3,265 МэВ. Это означает, что образующийся нейтрон имеет энергию 2,451 МэВ, если пренебрегать энергией дейтрона, и больше, если не пренебрегать. Видно, что энергия нейтронов даже больше, чем средняя энергия нейтронов деления ядер. Другой тип реакции называется эндотермическим и требует минимальной пороговой энергии частиц. Вблизи порога энергия нейтронов мала, так что использование этих нейтронов для БНЗТ очень эффективно. Сечения генерации нейтронов основных реакций представлены на рисунке 6. Основные параметры этих реакций приведены в таблице 1.

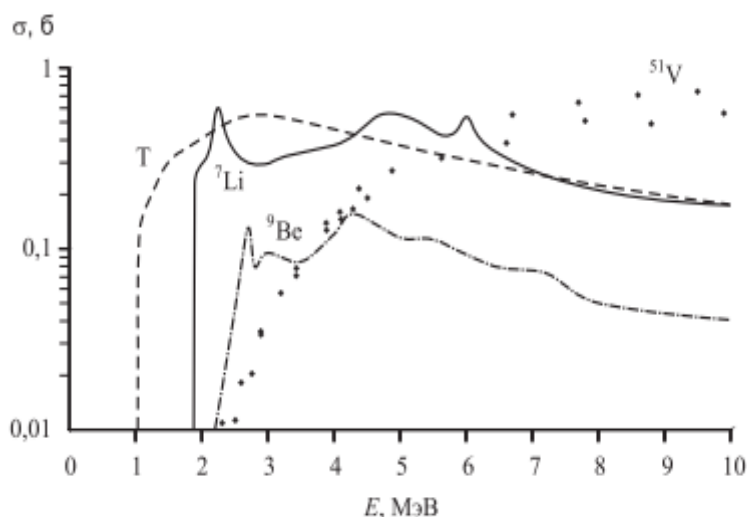


Рисунок 6. Зависимость сечения генерации нейтронов σ при взаимодействии протонного пучка с мишенями из T, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ и ${}^{51}\text{V}$ от энергии протонов E [2]

В работе [4] было отмечено, что наибольшее внимание сосредоточено на следующих четырех реакциях: ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$, ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$, ${}^{13}\text{C}(d,n){}^{14}\text{N}$, из которых наилучшей признавалась ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ из-за максимального выхода и минимальной энергии нейтронов. Однако создание литиевой мишени казалось проблематичным из-за низкой температуры плавления, низкой теплопроводности, высокой химической активности лития и из-за наработки радиоактивного изотопа ${}^7\text{Be}$.

Таблица 1. Основные параметры реакций генерации нейтронов [2]

Реакция	Энергия порога, МэВ	Энергия частиц, МэВ	Выход, н / мА с	Энергия нейтронов, кэВ	
				max	min
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	1,880	1,880	0	30	30
		1,890	$6,3 \cdot 10^9$	67	0,2
		2,500	$9,3 \cdot 10^{11}$	787	60
		2,800	$1,4 \cdot 10^{12}$	1100	395
${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$	2,057	2,057	0	20	20
		2,500	$3,9 \cdot 10^{10}$	573	193
		4,000	$1 \cdot 10^{12}$	2120	
${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$	0	0	0	3962	3962
		1,500	$3,3 \cdot 10^{11}$	4279	3874
${}^{13}\text{C}(d,n){}^{14}\text{N}$	0	0	0	4974	4974
		1,500	$1,9 \cdot 10^{11}$	6772	5616
T(d,n) ${}^4\text{He}$	0	0	0	14050	14050
		0,150	$4,5 \cdot 10^{10}$	14961	13305

1.4 Литиевая нейтроногенерирующая мишень

В качестве литиевой нейтроногенерирующей мишени рассматривались разные типы мишеней – струйная, ленточная сферичекая, объемная, вращающаяся, стационарная. Для практической реализации выбрана мишень стационарная, сложная, в изготовлении, но привлекательная в качестве оптимальной.

Литий характеризуется низкой температурной плавления (182°C) низкой теплопроводностью ($71\text{Вт/ м} \cdot \text{К}$) в твердом состоянии и $43\text{ (Вт/ м} \cdot \text{К)}$ в жидком при температуре плавления и высокой химической активностью. Генерация нейтронов в результате реакции ${}^7\text{Li (p,n)} {}^7\text{Be}$ сопровождается наработкой радиоактивного изотопа ${}^7\text{Be}$. Взаимодействие протонного пучка с литием приводит к генерации γ - квантов с энергией $0,478\text{ МэВ}$ в результате неупругого рассеяния протонов на ядрах лития γ -квантов с энергией $16\text{-}19\text{ МэВ}$ при радиационном распаде ядра ${}^8\text{Be}$ реакции ${}^7\text{Li (p,\gamma)} {}^8\text{Be}$ и α - частиц в результате термоядерных реакции ${}^7\text{Li (p,\alpha)} \alpha$ и ${}^6\text{Li (p,\alpha)} {}^3\text{He}$ с энергетическим выходом $17,347$ и $4,021\text{ МэВ}$.

Оптимальная стационарная мишень должна отвечать следующим требованиям.

1. Литиевый нейтроногенерирующий слой должен быть :

- Тонким – таким, чтобы протоны тормозились в нем до порога генерации нейтронов ; Это позволит существенно уменьшить сопутствующий поток
- γ -квантов с энергией $0,478\text{ МэВ}$ и уменьшить температуру на поверхности, лития ;
- Из чистого лития – для максимального выхода нейтронов : выход нейтронов из гидрида, оксида, и фторида лития меньше, чем из чистого лития, в $1,43$ и $3,3$. раза соответственно ;
- В твердом состоянии – для предотвращения распространения по установке паров лития и образующегося радиоактивного изотопа бериллия-7.

2. Подложка, на которую напыляется литиевый нейтроногенерирующий слой, должна быть :

- Тонкой – это позволит поместить оптимальный замедлитель максимально близко к месту генерации нейтронов и сформировать лучший по качеству терапевтический пучок нейтронов .

- Интенсивно охлаждаться , чтобы поддерживать литиевый слой в твердом состоянии при ее нагреве мощным протонным пучком .
- Стойкой к радиационным повреждениям .
- Простой в изготовлении
- Легкоъемной для ее утилизации после активации .

Для создания оптимальной мишени необходимо было решить такие проблемы , как : 1) напыление тонкого слоя чистого лития контролируемой толщины , 2) обеспечение эффективного теплосъема для сохранения лития в твердом состоянии при нагреве мощным протонным пучком, 3) выбор материала подложки , максимального стойкого к радиационным повреждениям 4) разработка конструкции мишени с активированным литиевым слоем и 5) утилизация активированной части мишени. Первый вариант мишени представлял собой молибденовую фольгу толщиной 0,2мм, диаметром 64мм, приваренную диффузионной сваркой к ребрам диска из стали АРМКО, в котором были сделаны каналы для протока теплоносителя. Тепловые испытания мишени , охлаждаемой водой или жидким галлием , проведены на ускорителе электронов ЭЛВ при энергии электронов 1,4 МэВ и мощности до 20 кВт. С использованием водяного охлаждения достигнут съем тепла до 650 Вт·см⁻². Жидкометаллическое охлаждение позволило поддерживать более низкую температуру поверхности мишени по сравнению с водяным. Но в процессе испытаний произошло разрушение мишени и через образовавшиеся отверстия в фольге и стальном диске вытекла часть галлия . Для выяснения причин разрушения мишени молибденовую фольгу отделили от стального приемника пучка . В результате обнаружено значительное разъедание стали АРМКО , однако фольга не подвергалась этому воздействию. Возможно , причиной повреждения мишени явилось вытекание части галлия через углубление для термопары в результате проедания стальной перегородки .

Выяснено, что увеличение диаметра мишени эффективно подавляет дозу протонов отдачи на поверхности фантома при незначительном уменьшении терапевтической дозы от реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ внутри него. Так увеличение диаметра с 5 до 10см приводит к уменьшению дозы протонов отдачи на поверхности фантома на 25% , в то время как терапевтическая доза уменьшается на 12% . Таким образом увеличение диаметра мишени , приводя к некоторому уменьшению мощности дозы , позволяет

применить воду в качестве охлаждающей жидкости для поддержания литиевого слоя в твердом состоянии.

Поскольку литиевый слой нейтронгениерирующей мишени тонкий, протоны в нем не поглощаются а только тормозятся до энергии немного ниже 1.882 МэВ. Дальнейшее торможение и поглощение протонов происходит в материале подложке и на которую напылен литиевый слой. Основные потери энергии протонов обусловлены ионизацией атомов вещества, сечение которого растет с падением энергии, вследствие чего основную часть энергии протон теряет перед моментом остановки (пик Брэгга). Торможение протонов с энергиями порядка 2МэВ происходит практически по прямой – их полный спроецированный пробег различается не более чем на несколько процентов.

Так, пробег протонов с энергией 2 МэВ в Li имеет величину 160мкм, Be-50, Al- 44, Ti-30, V-23, Fe, Cu, Mo, W- менее 20мкм. Известно, что при флюенсах облучения мишени $10^{14} - 10^{17}$ ион \cdot см⁻² происходит агломерация захваченных атомов газа, приводящая к образованию газовых пузырьков и объемному расширению материала вплоть до 10-15%. При дальнейшем облучении 10^{17} - 10^{20} ион \cdot см⁻² достигается насыщение количества имплантированного газа, захваченного в твердом теле, и поверхностный слой может деформироваться вплоть до образования блистеров пластинчатые куполообразные впучивания поверхностного слоя и отслаивания чешуек из –за повышения внутреннего давления газа и боковых напряжений сжатия. Появление развитой поверхности мишени может не только приводить к усиленному испарению лития из-за уменьшения теплопроводности, но и выводить мишень из строя.

При проведении терапии возможно использование как медной подложки простой в изготовлении и обладающей лучшей теплопроводностью для обеспечения эффективного теплосъема, так и подложки из V, Ta или α – Fe требующей значительно более редкой смены. Каждый пациент, за исключением первого, будет получать дополнительную дозу от радиоактивного изотопа бериллия, образовавшегося при облучении предыдущих пациентов. Важным процессом, который следует учитывать при разработке мишени, является γ - излучение. Неупругое рассеяние протонов на ядрах лития характеризуется сечением 40- 120 мб, определяемым резонансами при энергии 1,05, 2,05 и 2,25МэВ и приводит к значительному потоку γ -квантов энергией 0,478 МэВ, сравнимому с потоком нейтронов. Для определения конструкционного материала подложки нейтронгениерирующей мишени обеспечивающего минимальный

выход сопутствующего γ - излучения экспериментально изучено излучение при поглощении 2 МэВ протонов в различных материалах . Вместо нейтронгенерирующей мишени был установлен специально изготовленный вакуумный объем (труба из нержавеющей стали с внутренним диаметром 100мм , толщиной стенки 2мм , дном из медного диска толщиной 16мм , охлаждаемого водой)и патрубков с кварцевым стеклом для наблюдения за образцом . На днище вакуумного объема помещали различные материалы , изготовленные преимущественно в виде тонких дисков диаметром 95мм , и с помощью магнитной развертки равномерно облучали протонным пучком с энергией 2 МэВ и током до 500 мкА. На рисунке 7 приведены спектры γ - излучения при поглощении протонов с энергией 2 МэВ в конструкционных материалах , измеренные ВГО γ -спектрометром. Поглощение протонов в литии приводит к генерации монохроматического потока γ - квантов с энергией 478 кэВ. На рисунке 7 видно , что молибден и тантал практически полностью лишены γ - излучения.

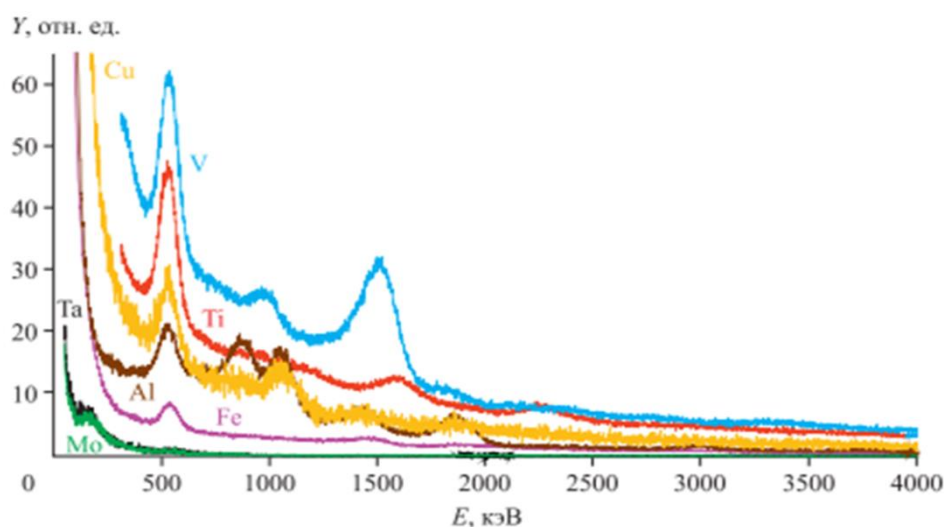


Рисунок 7. Спектры γ - излучения материалов , облучаемых протонным пучком с энергией 2 МэВ . V – ванадий ; Ti- титан ; Cu- медь ; Al – алюминий ; Fe – нержавеющая сталь ; Ta- тантал ; Mo- молибден [2]

Для напыления лития на подложку мишени разработана и изготовлена система напыления (рисунок 8) При ее изготовлении был использован промышленно производимый шиббер. На тарелку шиббера 2 помещен нагреватель 3 , а под тарелку установлен испаритель с круглой щелью 5, в который закладывается литиевый контейнер 4. Перед напылением тарелка шиббера выезжает в протонопровод и сдвигается в направлении к мишени на 5 мм , используя механизм уплотнения шиббера . В результате такого сдвига тарелка упирается в сильфон 7, что ограничивает объем напыления .

Затем включается нагреватель, и пары лития распространяются через круговую щель 5. Поскольку сильфон теплоизолирован и в процессе напыления нагревается, то напыления на сильфон не происходит, напыляется только подложка мишени 6, которая охлаждается водой. Перед напылением в нагреватель закладывались литиевые контейнеры, представляющие собой тонкостенные полые замкнутые алюминиевые корпуса, заполненные чистым литием.

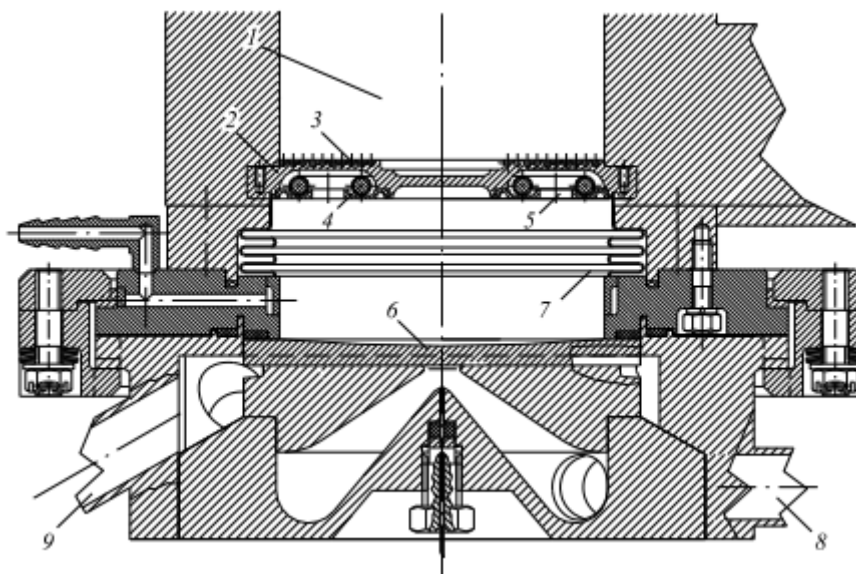


Рисунок 8. Нейтроногенерирующая мишень с системой напыления лития :
 1- протонопровод , 2- тарелка шибера , 3- нагреватель , установленный на тарелку шибера , 4- контейнер с литием , 5 – круговое отверстие для выхода паров лития , 6- приемник пучка , на который напыляется литиевый слой , 7- сильфон , 8 и 9- ввод и вывод воды для охлаждения [2]

При нагревании литий вступает во взаимодействие с алюминием, и этот сплав плавится при меньшей температуре. Поскольку при этой температуре давление паров алюминия порядка 10^{-12} Торр, а лития – 10^{-3} Торр, то испарятся только литий. Пары лития вылетают через круговое отверстие диаметром 7 см, шириной 0,6 см, вырезанное внизу под тарелкой шибера и осаждаются на охлаждаемую подложку мишени. Для определения толщины литиевого слоя на охлаждаемую мишень диаметром 10 см два ряда (крестом) были выложены тонкие медные пластинки – свидетели площадью 1 см^2 , которые через индий – галлиевое соединение имели хороший тепловой контакт с мишенью. Следует заметить что если свидетеля просто положить на поверхность, то напыляется значительно более тонкий слой, что связано с большей температурой свидетеля. После напыления рабочий объем заполняется воздухом.

Мишень , на которую напылен литий, снимается и « свидетели » помещаются в воду. По проводимости воды измеряется количество лития , напыленного на « свидетеля».

При этом генерация нейтронов сопровождается накоплением радиоактивного изотопа Be^7 внутри литиевого слоя. Эффективным теплосъем позволяет поддерживать литиевый слой в твердом состоянии (ниже температуры плавления лития) при его нагреве мощным протонным пучком. Тем самым обеспечивалось удержание радионуклида внутри литиевого слоя и его нераспространение по всей установки. После достижения некоторой величины активности, препятствующей проведению экспериментов или терапии , либо при достижении предельного времени эксплуатации мишени под радиационным воздействием протонного пучка предполагается снятие мишени и перемещение части мишени , а именно приемника пучка с литиевым слоем в защитный контейнер для дезактивации.

Для генерации нейтронов рассматривались два режима : стандартный – при энергии протонного пучка 2,5 МэВ и пороговый – при 1,915 МэВ . В первом случае выход нейтронов равен $8,9 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ при токе протонов 10 мА , во втором – почти в 30 раз меньше. С точки зрения активации мишени худшем является режим генерации при энергии 2,5 МэВ который рассмотрим . С каждым нейтроном связано образование ядра Be^7 превращающегося с периодом полураспада 53,3 сут в стабильное ядро ^7Li . В 10,3% случаев распад сопровождается испусканием фотона с энергией 0,4776 МэВ. Для оценки активации мишени будем полагать, что источник генерирует нейтроны не круглосуточно, а только 1/10 времени, что представляется достаточно реалистичным и даже вряд ли достижимым . Нарботка бериллия происходит с характерным временем 77 дней и примерно через год активность Be^7 выходит на стационарное значение $8,9 \cdot 10^{11}$ Бк, численно равное скорости генерации нейтронов при среднем токе 1 мА. При такой активности из мишени в секунду будут испускаться $9,2 \cdot 10^{10}$ фотонов с энергией 0,4776 МэВ.

Изометрический вид мишенного узла с приемником пучка представлен на рисунке 9 .

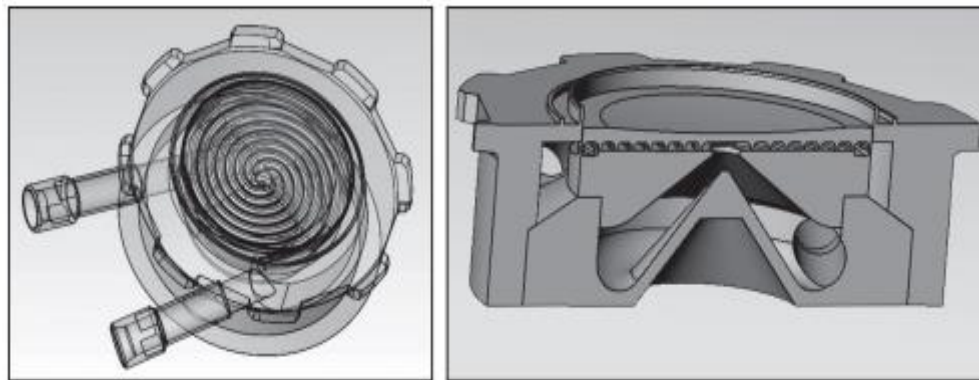


Рисунок 9 . Изометрический вид мишенного узла с приемником пучка[2]

Важным элементом мишени является приемник пучка, изготовленный из меди в виде диска диаметром 122мм , максимальной толщиной 8 мм (протонный пучок облучает поверхность диаметром 100мм), на который напыляется тонкий литиевый слой . Со стороны протонного пучка сделано сферическое углубление 2мм , радиусом 626мм для предотвращения деформации под влиянием давления охлаждающей воды. Приемник пучка плотно прижимается к корпусу мишени . Охлаждающая вода тангенциально вводится во внутреннюю полость корпуса мишени, раскручивается, как в циклоне через отверстие в центре направляется в каналы приемника пучка и далее по двухзаходным спиралевидным каналам вытекает наружу. При давлении дистиллированной воды на входе 2 атм в каналах приемника пучка и реализуется турбулентное течение воды (число Рейнольдса $4 \cdot 10^4$) со скоростью 10 м /с , обеспечивая требуемый теплосъем и поддерживая литиевый слой в твердом состоянии вплоть до мощности нагрева 25 кВт.

1.5 Система формирования пучка нейтронов

Несмотря на то что использование реакции ${}^7\text{Li} (p,n)\text{Be}^7$ позволяет генерировать нейтроны с наиболее мягким спектром из возможных , но для БНЗТ требуется их замедление –« идеальными» считаются нейтроны с энергиями в районе 10кэВ . Для формирования терапевтического пучка нейтронов применяют систему формирования пучка (СФП) , включающую в себя замедлитель , отражатель , поглотитель и в ряде случаев фильтр. В качестве фантома, в котором рассчитывается перенос нейтронов и γ -излучения и вычисляется распределение доз , практически всеми стал применяться

модифицированный фантом головы Снейдера – три вложенных друг в друга эллипсоида с разными составами элементов ,максимально приближенными к составам кожи, и кости и мозга . В расчетах используют значения относительной биологической эффективности (ОБЭ) из работы (для тканей мозга ОБЭ фотонов равна 1,0, нейтронов – 3,2) и составной биологической эффективности (СБЭ) -1,35 . Для опухоли ОБЭ полагается такой же , в то время как СБЭ – 3,8 . На рисунке 10 приведена СФП источника ИЯФ СО РАН , подобная многим другим .



Рисунок 10 . Геометрия системы формирования пучка и расположение модифицированного фантома головы Снейдера [2]

Во первых , поглощение нейтронов бором , в результате которого выделяется энергия 2,79 МэВ которая в 6,1 % случаев распределяется только между ядрами лития и α - частицей , 93,9% ,случаев ядро лития вылетает в возбужденном состоянии и испускает γ - квант энергией 0,48 МэВ. Во вторых захват нейтронов ядрами водорода , приводящий к образованию дейтерия и к испусканию γ -кванта энергией 2,2 МэВ. В третьих , появление протонов отдачи как от взаимодействия нейтронов , преимущественно быстрых , с ядрами вещества , преимущественно водородом , так и от поглощения нейтронов ядрами азота с выделением энергии 580 кэВ . Достаточно часто учитывается поток γ - квантов от мишени . Таким образом , выделяют и приводят следующие компоненты доз : так называемая борная – от α - частицы и иона лития, доза быстрых нейтронов (от протонов отдачи при упругом рассеянии нейтронов) , доза от поглощения нейтронов азотом (также результате появления протонов отдачи) и доза γ -квантов – от всех γ -квантов , включая те , которые появляются при поглощении

нейтронов бором и водородом а также те, которые вылетают из мишени , системы формирования пучка и других конструкций. В качестве замедлителя рассматривают фторид алюминия или фторид магния . Рассмотрим в деталях упругое рассеяние нейтронов на магнии алюминии . Поскольку массовые числа ядер магния и алюминия близки, то и близки значения средних логарифмических потерь энергии ξ : 0,08- для магния и 0,072 для алюминия. Скорость замедления нейтронов на этих ядрах во фторидах пропорциональна плотности ядер , сечению рассеяния и величине средней логарифмической потери энергии (на рисунке 11).

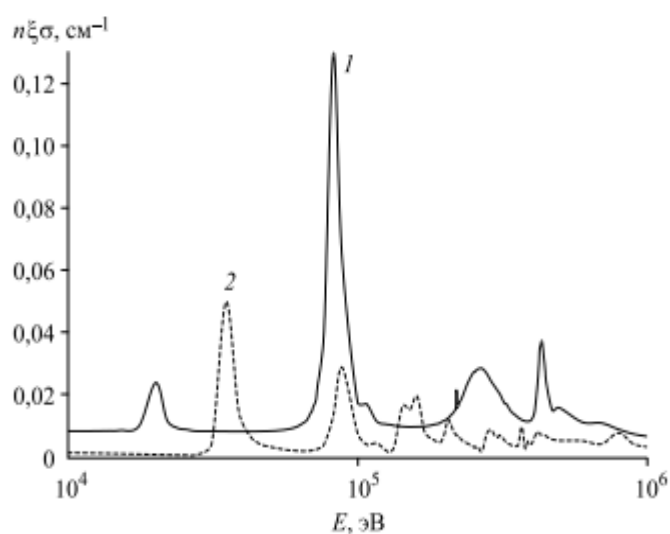


Рисунок 11. Зависимость скорости замедления нейтронов на фториде магния (1) и фториде алюминия (2) от энергии нейтронов [2]

Замедлитель из фторида магния по сравнению с замедлителем из фторида алюминия обеспечивает более мягкий спектр, меньший поток быстрых нейтронов ,лучшее терапевтическое отношение, но меньший поток эпитепловых нейтронов и соответственно меньшую мощность поглощенной дозы в опухоли . Поскольку генерируемые вперед нейтроны имеют значительно большую энергию , чем те которые вылетают назад , то оптимально в передней полусфере применить графитовый отражатель в котором отражение нейтронов будет сопровождаться их замедлением $\xi=0,158$, в задней – свинцовый , в котором отражение нейтронов будет происходить практически без потери энергии $\xi=0,01$. Обычно рассматривают протонный пучок с энергией 2,5 – 2,8 МэВ при этом такой режим часто называют стандартным . В этом случае выход нейтронов достаточно большой и их энергия еще не слишком высокая. Предложенные для этого режима СФП обеспечивают мощность дозы 0,1- 0,2 Гр экв

/мин·мА глубину терапии до 10см, терапевтическое отношение доб. Эти параметры приемлемы для проведения бор – нейтронозахватной терапии. Поскольку реакция ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ отличается необычайно быстрым ростом сечения вблизи порога , то изначально крайне привлекательным представлялся припороговый режим генерации ,при котором энергия протонов ненамного превышает порог генерации нейтронов 1,882 МэВ. – обычно рассматривалось значение 1,915МэВ. Лучший по качеству терапевтический пучок нейтронов можно получить , используя нейтроны , вылетающие перпендикулярно протонам , поскольку они изначально имеют более мягкий спектр , чем стандартном режиме. Повернув замедлитель на 90^0 и окружив его отражателем , можно получить увеличение мощности дозы , глубины терапии и терапевтического отношения. Ортогональный режим привносит новое качество в терапию - позволяет осуществить облучения пациента под любым углом простым вращением СФП. Облучить разные участки кожи и тем самым улучшить терапевтическое отношение .

ГЛАВА 2 ВАЛИДАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА ПОТОКА ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАКЦИИ



В главе 2 описан детектор, выполненный по подобию ранее предложенного, и представлены результаты численного моделирования чувствительности детектора и его экспериментального использования. Показано, что детектор чувствителен к эпитепловым нейтронам и имеет плоскую кривую чувствительность в диапазоне эпитепловых нейтронов в то время как его чувствительность к тепловым и быстрым нейтронам низкая. Предложено улучшение детектора позволяющее не только уменьшить вклад быстрых нейтронов в чувствительность детектора.

2.1 Проектирование детектора

Принцип работы монитора потока эпитепловых нейтронов основан на методе активации с использованием ${}^{71}\text{Ga}(n,\gamma)\text{Ga}^{72}$ поскольку чувствительности монитора в диапазоне энергий эпитепловых нейтронов значительно более однородны чем у других рассмотренных реакций т.е., ${}^{197}\text{Au}(n,\gamma){}^{198}\text{Au}$, ${}^{151}\text{Eu}(n,\gamma){}^{152\text{m}}\text{Eu}$, ${}^{127}\text{I}(n,\gamma){}^{128}\text{I}$, ${}^{115}\text{In}(n,\gamma){}^{116\text{m}}\text{In}$, ${}^{55}\text{Mn}(n,\gamma){}^{56}\text{Mn}$, ${}^{37}\text{Cl}(n,\gamma){}^{38}\text{Cl}$ и ${}^{23}\text{Na}(n,\gamma){}^{24}\text{Na}$. Детектор изготовлен подобно оригинальному. Размеры детектора 63,2 мм в высоту и 65,2 мм в диаметре. В детекторе активационный материал (фольга галлия диаметром около 10мм и вес около 50мг) расположен в геометрическом центре полиметилметакрилата (ПММА) цилиндра (замедлитель нейтронов 63мм в высоту и 65 мм в диаметре) покрытого фольгой Cd толщиной 0,1мм в качестве поглотителя тепловых нейтронов. В отличии от оригинального детектора наш детектор изготовлен из ПММА, не полиэтилен высокой плотности в качестве активационного материала используют чистый галлий в виде фольги, а не GaN пластина, и толщина кадмиевой фольги 0,1 мм, а не 0,05 мм.

Изомерный вид детектора представлен на рисунке 12. Детектор сделан разборным для того, чтобы вынимать из него активированный галлий и измерять его активацию.

Галлий размещают в углублении ПММА диска диаметром 20 мм толщиной 7 мм, которой накручивают на часть замедлителя, выполненного в виде усеченного конуса. Конус с накрученным диском вкручивают в основное тело детектора так, что активационный материал расположен в геометрическом центре ПММА цилиндра. Основания и стороны поверхности цилиндра покрывают кадмиевой фольгой толщиной 0,1мм. Конечно, можно галлий и не вынимать из детектора и измерять, не разбирая детектор. Однако в этом случае помимо линий излучения галлия будет присутствовать линия излучения кадмия, которая хоть и отличается по энергии, но она более интенсивная. Дополнительная загрузка ведет к увеличению мертвого времени спектрометра и к систематической ошибке в измерении. Интенсивность γ -излучения измеряется высоким чистым германиевым спектрометром (SEG-1KP-ИРTP 12 произведенный институтом Физик - Технических Проблем, Дубна, Россия).

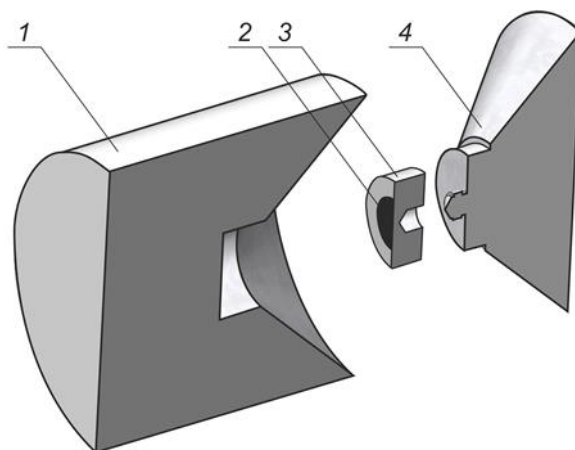


Рисунок 12. Схема детектора потока эпитепловых нейтронов : 1 – основная часть цилиндра из ПММА , 2- галлиевая фольга , 3- диск размещения фольги , 4- ввинчиваемая часть цилиндра из ПММА

2.2 Моделирование чувствительности детектора

Сечение реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ приведено на рисунке 13. Видно, что в области энергий эпитеплого диапазона имеется целый ряд резонансов с высоким значением сечения реакции, что обеспечивает избирательную эффективность детектора к эпитепловым нейтронам. Применение ПВП в качестве замедлителя позволяет, как показано в работе [5], добиться плоскую кривую чувствительность в диапазоне энергий эпитепловых нейтронов, в то время как обладает низкой чувствительностью к тепловым нейтронам и к быстрым нейтронам.

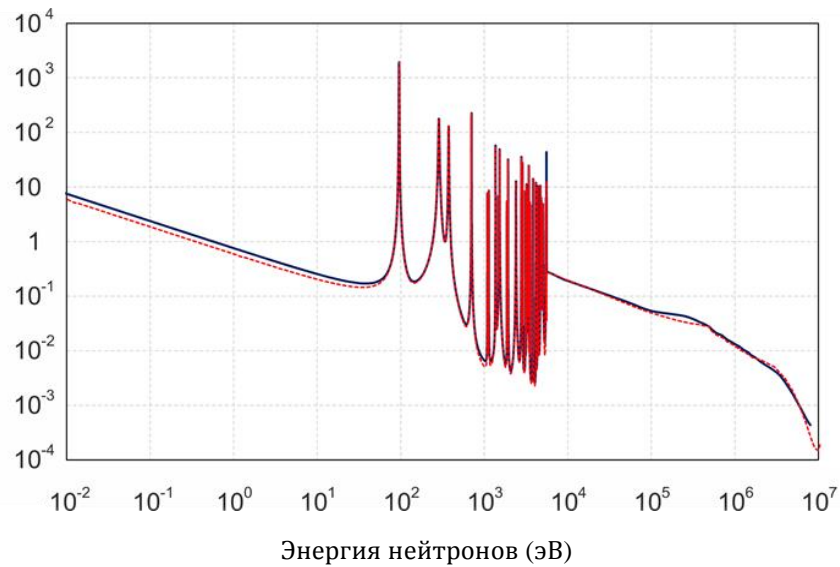
$\sigma, б$ 

Рисунок 13. Поперечное сечение реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$: в библиотеке ENDF-VII (синяя сплошная линия) в библиотеке JENDL – 4,0 (красная штриховая линия) [6].

Чувствительность детектора для ряда значений энергии нейтронов моделирована методом Монте-Карло с использованием кода NMC и ENDF-VII библиотеки, оцененных данных падающих - нейтронов. Источник нейтронов задают кругом диаметром 6,52 см, расположенным на расстоянии 10 см от цилиндра из орстекла так, как представлено на рисунке 12. Массу галлия берут равную 51,2 мг. Температуру детектора задают равной 20 °С. Результаты расчета представлены на рисунке 14. Там же для сравнения представлены результаты расчета чувствительности оригинального детектора с такой же массой галлия в пластине нитрида галлия.

Выход продукции ^{72}Ga (атомы на нейтрон /см²)

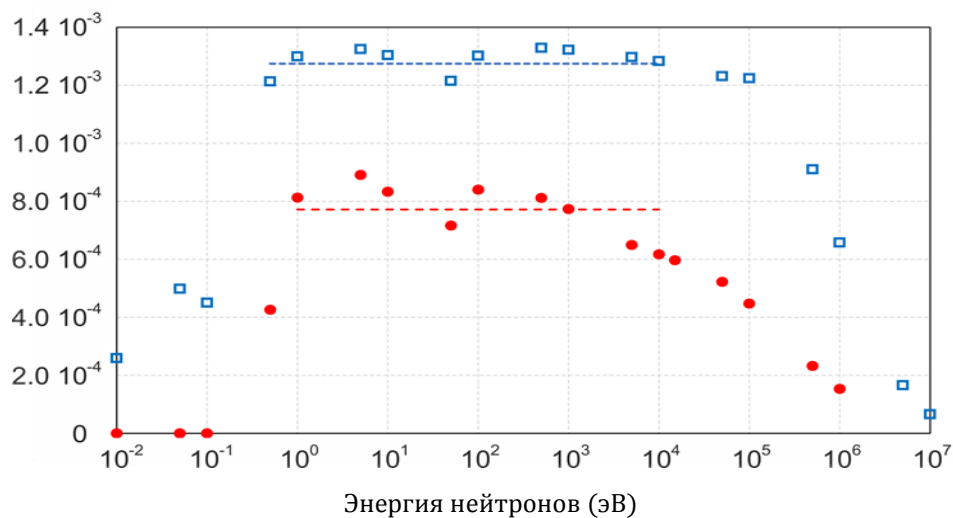


Рисунок 14 . Рассчитанная чувствительность детектора эпитеплового нейтронного потока : сплошные круги посчитанные нами, квадраты – из работы [5]. Чувствительность, усредненная для диапазона энергий нейтронов от 1 эВ до 10 кэВ показана штриховой линией.

Первое, на что сразу обращаешь внимание, так это существенное отличие двух этих расчетов. Нами посчитанная чувствительность детектора, усредненная в энергетическом диапазоне от 1 эВ до 10 кэВ, составила $\eta = (7.7 \pm 0.9) 10^{-4}$ (н/см²), что в 1,6 раза меньше аналогичной величины оригинального детектора. Если мы использовали в расчетах, то авторы работы [5] - JENDL-4.0 библиотека. Иногда данные в разных библиотеках могут отличать друг от друга, как, например, значения сечения реакции ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ [8], но в данном случае значения ${}^{71}\text{Ga}(n,\gamma){}^{72}\text{Ga}$ сечения реакции не отличаются.

Конечно, достоверность расчетной эффективности оригинального детектора добавляет то, что авторы измерили детектором плотность потока эпитепловых нейтронов на ряде установки источника нейтронов и показали его хорошее согласие со ссылкой на один.

Если в области энергий эпитеплого диапазона чувствительность нашего детектора и чувствительность оригинального детектора хоть и отличаются в 1,6 раз, но они похожи, то в области тепловых нейтронов или быстрых нейтронов разница в поведении значительная.

Так, в наших расчетах детектор не чувствителен к тепловым нейтронам (< 0.4 эВ) и этот результат кажется естественным. Во-первых, тепловые нейтроны не характеризуются высокой проникающей способностью, чтобы пройти 3 см ПВП (рис. 1 в [9]) и достичь галлия. Во-вторых, детектор обернут кадмием, поглощающим тепловые нейтроны. В-третьих, даже если нейтроны и достигли галлия, то вероятность их поглощения галлием мала, поскольку сечение реакции составляет всего несколько единиц барн, как видно из рисунка 13. И, в-четвертых, тепловые нейтроны эффективно поглощаются водородом. Третий и четвертый аргумент можно объединить и представить следующим образом. Хотя сечение радиационного захвата теплового нейтрона (0,025 эВ) галлием в 3,5 раза больше сечение радиационного захвата атомным ядром водорода (1,16 б и 0,33 б, соответственно), но атомных ядер водорода в цилиндре ПММА массой 240 г в $2,7 \cdot 10^4$ раз больше, чем атомных ядер галлия весом 52 мг. Следовательно, тепловой нейтрон со значительно большей вероятностью поглотится водородом, чем галлием. Так что кажется странным высокое значение эффективности регистрации теплового нейтрона оригинальным детектором. Возможно, в расчетах автором работы [5] не учитывалось поглощение нейтронов водородом и кадмием или не задавали конечную температуру детектора или и то и другое.

Аналогично вызывает сомнение и высокая эффективность регистрации оригинальным детектором быстрых нейтронов (> 10 кэВ). Сечение упругого рассеяния нейтрона водородом, обеспечивающее замедление нейтронов, имеет вид плато в области эпитепловых значений энергий с характерным значением 20 б и уменьшается при увеличении энергии нейтронов с 10 кэВ (при 1 МэВ – 4 б). Следовательно, быстрые нейтроны имеют большую длину пробега ПВП и потому должны иметь меньшую эффективность регистрации детектором. Кстати, на рис. 1 в [9] приведен график распределения дозы опухоли в водном фантоме при моноэнергетическом нейтронном облучении, из которого видно, что как только энергия нейтронов превысила диапазон эпитепловых, так сразу уменьшается плотность термализованных нейтронов (заметим, что торможение нейтронов в воде и ПВП подобны).

Итак, суммируя вышесказанное можно сделать следующие утверждения:

1) Несмотря на отличия в эффективности регистрации нейтронов нашим детектором и оригинальным детектором, они имеют общее сходство: Детектор чувствителен к эпитепловым нейтронам и имеет плоскую кривую чувствительности в диапазоне эпитепловых нейтронов в то время как его чувствительность к тепловым (< 0.4 эВ) и быстрым нейтронам (> 10 кэВ) низкая. Это свойство позволяет использовать детектор для определения потока эпитепловых нейтронов нейтронного пучка БНЗТ.

2) Для использования детектора в практике необходимо устранить разногласие в эффективности регистрации, что может быть достигнуто как проведением совместных исследований, так и проведением независимых расчетов, так и тем и другим.

2.3 Экспериментальная валидация

Экспериментальная проверка детектора проведена на ускорительном источнике нейтронов ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией в Институте Ядерной Физики имени Г.И. Будкера СОРАН, Новосибирск, Россия [10]. Детектор размещают вдоль оси пучка протонов на расстоянии 100 мм от литиевого слоя нейтроногенерирующей мишени. Между мишенью и детектором вплотную к мишени располагают диски из оргстекла диаметром 200 мм толщиной 12 мм в количестве от 0 до 6 шт. Мишень в течение 1 ч облучают пучком протонов энергией 2 МэВ флюенсом 2,5 Кл. После облучения детектора последний разбирают, HPGe спектрометр измеряют активацию

галлиевой фольги, вносят коррекцию на массу галлия и восстанавливают плотность потока эпитепловых нейтронов. График зависимости плотности потока эпитепловых нейтронов, нормированного на 1 мА тока пучка протонов, представлен на рисунке 15.

Плотность потока эпитепловых нейтронов (нейтроны $\text{см}^{-2} \text{мА}^{-1}$)

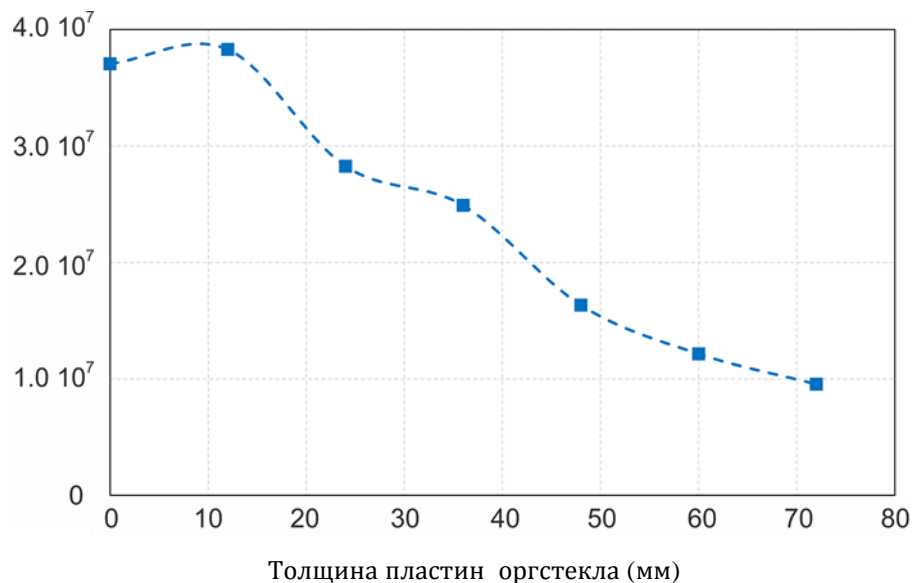


Рисунок 15. Зависимость плотности потока эпитепловых нейтронов от толщины замедлителя из оргстекла при энергии пучка протонов 2 МэВ

Известно [11], что при энергии протонов 2 МэВ из литиевой мишени испускаются нейтроны со средней энергией 75 кэВ; их выход равен $1,1 \cdot 10^{11}$ н/мКл, средний нейтронный угол – 51° . Добавление пластин оргстекла смещает спектр нейтронов в область эпитепловых нейтронов и одновременно увеличивает их рассеяние, что приводит к такому поведению плотности потока эпитепловых нейтронов, как показано на рисунке 15.

2.4 Улучшение детектора

Сечение упругого рассеяния нейтрона на атомном ядре ^{48}Ti , представленное на рисунке 16. Видно, что имеется заметный резонанс в районе 10 кэВ – как раз на границе деления спектра нейтронов на эпитепловые и быстрые. Это свойство используем для улучшения детектора: к основанию цилиндра, обращенного к потоку нейтронов, добавим титановый диск диаметром 65 мм толщиной 6 мм. Добавление этого титанового диска рассеивает нейтроны и уменьшает чувствительность детектора.

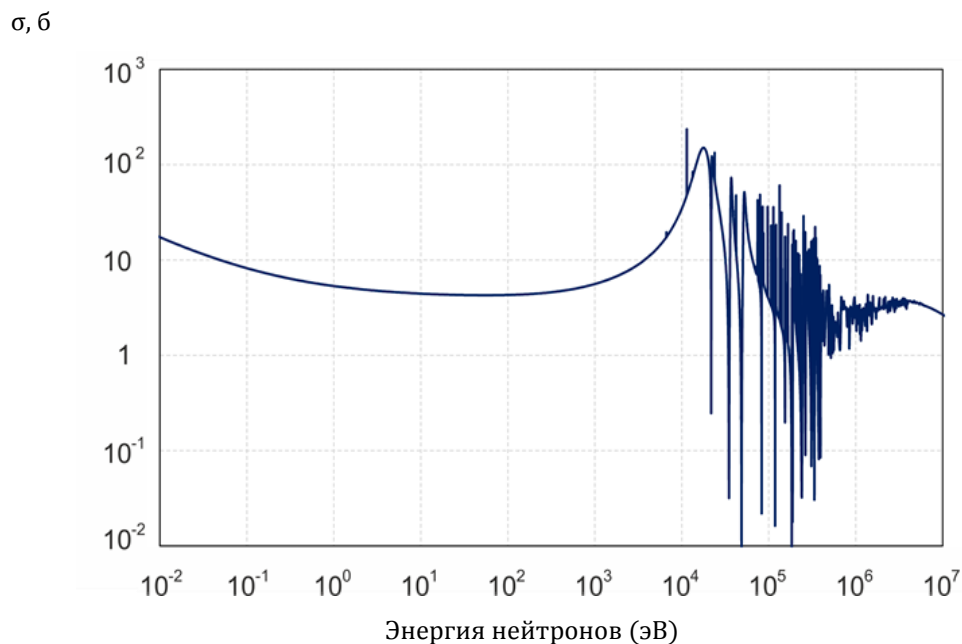


Рисунок 16. Сечение упругого рассеяния нейтрона на атомном ядре ^{48}Ti

На рисунке 17 приведен график, показывающий на сколько добавление диска уменьшает чувствительность детектора. Из этого графика видно, что если в области эпитеплого диапазано энергий чувствительность детектора уменьшается на величину в районе 10 %, то для 15 кэВ нейтронов – на 56 %.

Уменьшение чувствительности детектора, %

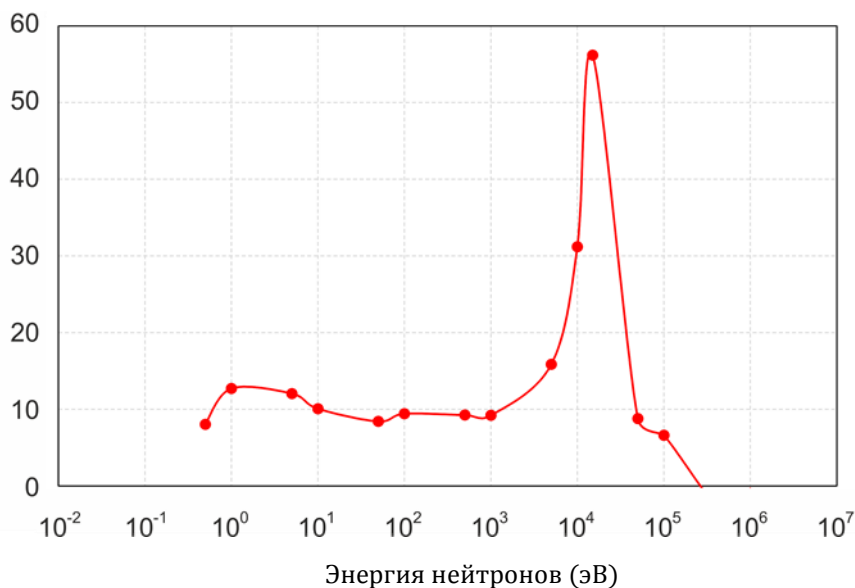


Рисунок 17. Уменьшенная чувствительность детектора из-за добавления титанового диска

Такое улучшение уменьшает чувствительность детектора к нейтронов в районе 10-30 кэВ и делает его более избирательным для эпитеплого диапазона энергий. Вместе с тем считается, что для терапии глубокоосидящих опухолей оптимальны нейтроны с энергией от 1 до 30 кэВ (рис. 4.11 в [3]). Также в той-же книге [3] на стр. 43

проф. А. Крейнер утверждает, что “эти нейтроны должны быть замедлены до эпитепловых нейтронов (энергии в интервале 0.5 эВ – 10 кэВ, идеально сосредоточенные вблизи верхнего предела этого диапазона) для глубокоосидающих опухолей”. Из этого следует, что для планирования терапии глубокоосидающих опухолей важна информация о потоке нейтронов с энергией от 1 до 30 кэВ. Такую информацию дает сравнение значений, полученных идентичными детекторами, один из которых дополнительно оснащен титановым диском. Если бы в спектре нейтронов присутствовали только эпитепловые нейтроны, то применение титаного рассеивателя уменьшало сигнал на 10 %. В наших экспериментах, результаты которых представлены на рисунке 15, регистрируемый детектором сигнал при использовании титанового диска уменьшается на 10 %, на 15 % при замедлителе толщиной 52 мм. Данный факт указывает на заметное содержание в спектре нейтронов компоненты с энергией в районе 10 кэВ, оптимальной для терапии глубокоосидающих опухолей.

2.5 Выводы

Для измерения потока эпитепловых нейтронов, важного для планирования бор-нейтронозахватной терапии, изготовлен цилиндрический активационный детектор с использованием $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ реакции подобный ранее предложенной группой китайских и японских ученых. Методом численного моделирования переноса нейтронов показано, что детектор чувствителен к эпитепловым нейтронам и имеет плоскую кривую чувствительность в диапазоне эпитепловых нейтронов в то время как его чувствительность к тепловым и быстрым нейтронам низкая. В работе отмечено, что нами рассчитанная эффективность детектора отличается от расчетной эффективности оригинального детектора. Сделаны предположения о возможных причинах различия значений эффективности и предложены способы их устранения. Также предложено оснастить детектор титановым рассеивателем, еще сильнее уменьшающим чувствительность детектора к быстрым нейтронам. Показано, что сравнение сигналов детектора без титаного рассеивателя и детектора с титановым рассеивателем позволяет оценить компоненту нейтронов с энергией в районе 10 кэВ, оптимальных для терапии глубокоосидающих опухолей.

Таким образом, цилиндрический активационный детектор с использованием $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ реакции может стать надежным инструментом в планировании бор-

нейтронозахватной терапии после дальнейшей экспериментальной и расчетной его валидации.

ГЛАВА 3 ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА – ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОДНОМ ФАНТОМЕ

В Главе 3 приведено измеренное значение пространственного распределения нейтронов и гамма – излучения в водном фантоме на ускорительном источнике нейтронов в Институте Ядерной физики им Будкера СО РАН. Продемонстрированы результаты экспериментальных исследований с использованием детекторов , обогащенного бором и не содержащего бора на основе пластикового сцинтиллятора и без сцинтиллятора, для измерения мощности дозы нейтронов и гамма – излучения в водном фантоме .

3.1 Источник нейтронов

Важное значение для получения моноэнергетических нейтронов имеет реакция [14] : ${}^7\text{Li}_3 + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n} - 1,646 \text{ МэВ}$.

Для получения моноэнергетических нейтронов , энергию которых можно изменять в очень широких пределах используют реакцию (p,n). Эта реакция сводится к замене в бомбардируемом ядре нейтрона протоном. В реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ конечное ядро ${}^7\text{Be}$ имеет избыток позитронов и поэтому превращается в начальное бомбардируемое ядро [16] . Протоны ускоряются , как правило до энергии 2 МэВ с помощью ускорителя – тандема с вакуумной изоляцией. Протонный ток составляет ~1 мА. Образующиеся нейтроны имеют энергию в диапазоне 30-500 кэВ [14]. Энергия испускаемых нейтронов , в случае тонкой мишени , составляет ~30кэВ. Мишень представляет собой диск из Li металла (${}^7\text{Li} > 99\%$) диаметром 84 мм и толщиной 100 мкм . Протонный пучок имеет диаметр 10мм . Пучок заряженных частиц , облучающий мишень , должен быть как можно больше , чтобы распределить тепловую нагрузку , но все же должен оставаться достаточно малым , чтобы ограничить потери тех нейтронов , которые

генерируются вблизи краев мишени .Потому что пучок заряженных частиц генерирует тепло , когда он останавливается в материале мишени . Производство нейтронов в результате этой реакции является высоким, а относительно мягкий (низкоэнергетический) спектр требует меньшего замедления , чем те которые генерируются в других реакциях.

Температура плавления чистого металлического лития низкая. Литий - реакционноспособный металл , образующий соединения сразу после взаимодействия с воздухом. Комната облучения имеет размеры 10,8м× 9,1м×10м. Стены толщиной от 1,2м до 1,3м. Нейтроны , возникающие от литиевой мишени , замедляются до энергии 10 кэВ с использованием системы формирования пучка .

3.2 Материал

Для моделирования человеческой головы использован водный фантом из поликарбоната толщиной 8мм , заполненный водой . Наружный диаметр 313 мм, а длина составляет 330 мм .Окно фантома изготовлено из ПЭТ пластика толщиной 0,5 мм [17] . В детекторе использовали пластиковые сцинтилляторы на основе полистирола : SC -331 , обогащенный бором , и SC -301 без бора , которые были разработаны в начале 2000 - х годов в Институте Физики Высоких энергий . Сцинтиллятор SC -331 содержит 0,9 % природного изотопа бора - 10 [18] . Так как значительно более высокой концентрации бора – 10 в материале сцинтиллятора по сравнению с тканями пациента .Вещества , испускающие свет под действием ионизирующего излучения , называются сцинтилляторами . У подавляющего большинства веществ энергия возбужденного атома переходит в энергию движения молекул или тепло , так как в результате взаимодействия соседних атомов и молекул среды энергия возбужденного атома передается соседним атомам и молекулам , прежде чем сможет произойти испускание излучения [15].

Чувствительный элемент детектора представляет собой цилиндр диаметром 1мм и длиной 1мм , изготовленный из пластикового сцинтиллятора . Чувствительность детектора будет тем больше , чем больше число атомов ^{10}B в объеме пронизываемом нейтронами . Прежде всего это высокая эффективность для проникающих излучений (для γ - излучения – десятки процентов). Время высвечивания сцинтилляторов

примерно $2,5 \cdot 10^{-9}$ с. Это обеспечивает высокую временную разрешающую способность сцинтилляционных счетчиков или малое мертвое время счетчиков.

3.3 Система формирования пучка нейтронов

Система формирования пучка нейтронов состоит из замедлителя MgF_2 , расположенного ближе к мишени, составного отражателя, поглотителя и фильтра. Ближе к мишени расположен замедлитель фторида магния толщиной 21 см. Замедлитель из фторида магния обеспечивает более мягкий спектр, меньший поток быстрых нейтронов, но меньший поток эпитепловых нейтронов соответственно меньшую мощность поглощенной дозы в фантоме. В качестве отражателя используют свинец и графит. С учетом использования тепловых нейтронов были использованы фильтры из Bi 1 см и Ti толщиной 1 см для избежания нежелательного загрязнения пучка быстрыми нейтронами, тепловыми нейтронами и γ -квантами [19].

3.4 Эксперимент водного фантома

В этом исследовании проводится измерение пространственного распределения нейтронов и гамма-излучения в водном фантоме. Генерация нейтронов в результате реакции ${}^7Li(p, n){}^7Be$ осуществлялась в бункере 3 на литиевой мишени, установленной в систему формирования пучка. Детектор А был размещен снаружи водного фантома, рядом со фантомом установлен стационарный дозиметр гамма-излучения. Детекторы В и С размещаются на фантомной платформе и перемещаются вдоль оси пучка X, Y, Z. Сцинтилляционные детекторы можно применять для измерения мощности дозы от γ и нейтронного излучений; для исследований спектров γ - и нейтронного излучений. Водный фантом облучали пучком эпитепловых нейтронов после замедления нейтронов, генерируемых на литиевой мишени, установленной внутри системы формирования пучка в горизонтальном канале. Пучок эпитепловых нейтронов можно получить с использованием набора фильтров системы формирования пучка. Эпитепловые нейтроны входят через стенку в фантом. В замедлителе из воды нейтроны термализуются и замедляются до теплового диапазона

энергий и регистрируются борным датчиком, расположенным в глубине фантома (рисунок 18).

В водном фантоме положением оси X, Y, Z пучка управляет компьютер и измерение в каждой точке занимает не большие секунды.

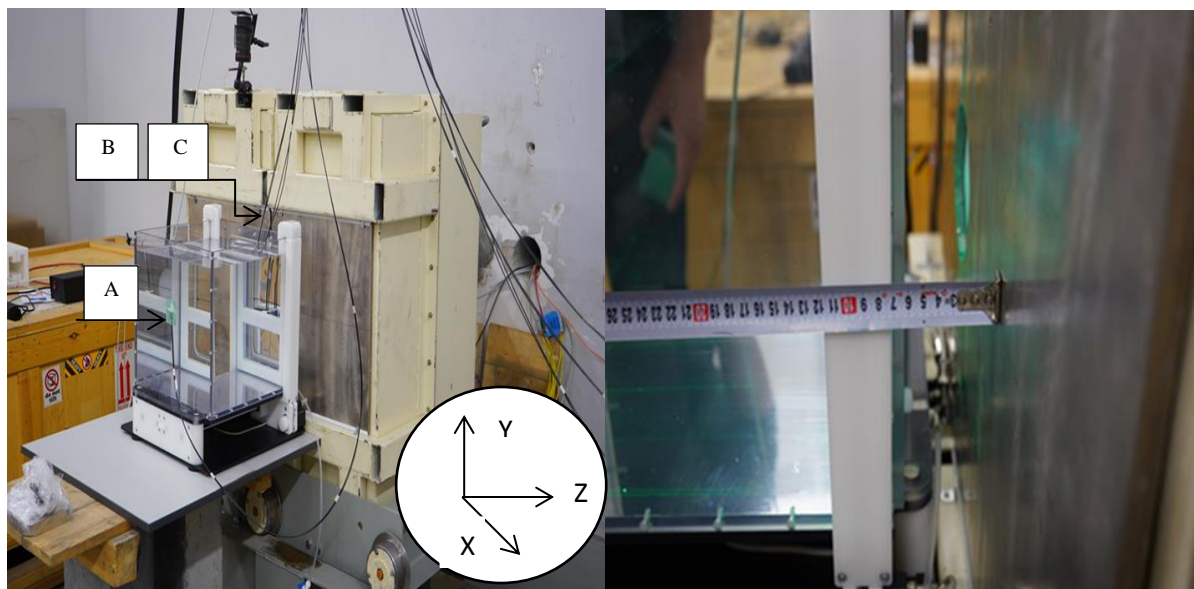


Рисунок 18. а) Экспериментальная установка с водным фантомом
б) Крайняя стенка фантома находилась на расстоянии 7-8 см от мишени

3.5 Определение мощность дозы нейтронов и гамма-излучения

Мощность дозы нейтронов вдоль оси (X, Y, Z) от положения центра водного фантома (мощность дозы нейтронов, нормированная на ток) вычисляется по соотношению:

$$P_n = \frac{D_{B(n)}}{I} \text{ (Зв/(ч*мА))}$$

Где: $D_{B(n)}$ (Зв/ч) - доза нейтронов, регистрируемая детектором В, I (мА) - протонный ток высоковольтного источника (ЭЛВ).

Для определения мощности дозы гамма-излучения (мощность дозы γ -излучения, нормированная на ток) определяется из формулы:

$$P_\gamma = \frac{D_{B(\gamma)} - D_{C(\gamma)}}{I}$$

Где : $D_{B(\gamma)}$ - доза гамма – излучения , регистрируемая детектором В
 $D_{C(\gamma)}$ - доза гамма – излучения , регистрируемая детектором С
 I (мА) - протонный ток высоковольтного источника (ЭЛВ)

3.6 Результаты и обсуждения

Результаты измерения мощности дозы нейтронов и гамма – излучения для замедлителя с MgF_2 :

Мощность дозы нейтронов и гамма – излучения вдоль оси X (-110 ; 120) на разных расстояниях Z (10, 40, 90, 130) от стенки фантомной поверхности при энергии протонного пучка 2,07 МэВ и протонном токе 1,3 мА, измеренная борным датчиком . Максимальная нормированная мощность дозы нейтронов по центральной оси достигается на глубине 10 мм в водном фантоме (рисунок 19).

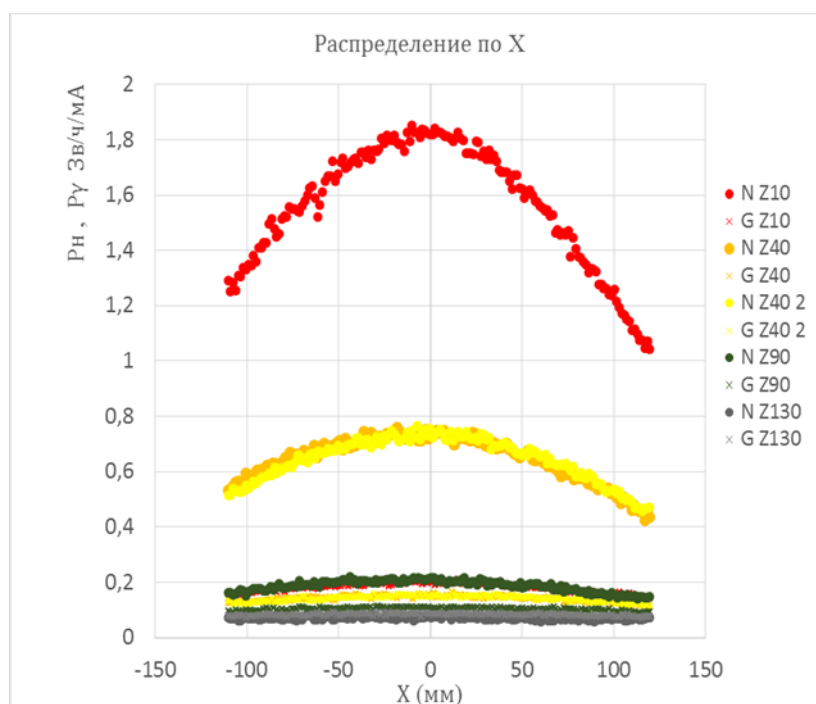


Рисунок 19 . Зависимость мощности дозы нейтронов и гамма - излучения от расстояния оси X

Проведено измерение мощности дозы нейтронов и гамма – излучения вдоль оси Y (-110 , 110) по высоте . Описанное выше распределение совпадает с распределением

дозы нейтронов и гамма-излучения вдоль оси Y (-110, 110) фантома. Мощность дозы гамма-излучения составляет 0,2 Зв/(ч*мА) (рисунок 20).

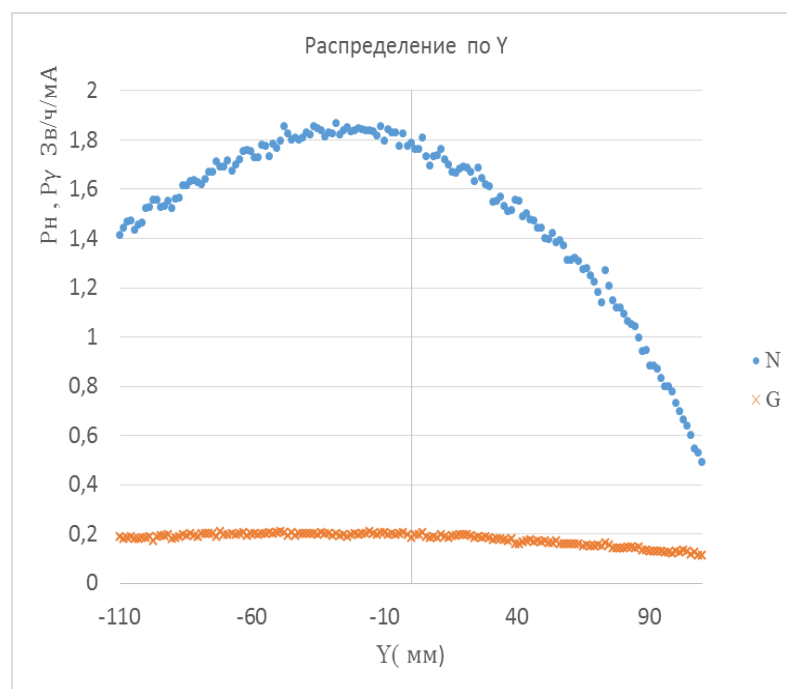


Рисунок 20. Зависимость мощности дозы нейтронов и гамма-излучения от расстояния оси Y

Разница ($V_\gamma - C_\gamma$) в подсчете дозы нейтронов и гамма-излучения вдоль глубины фантома Z (0, 130) по удалению от стенки поверхности фантома в центре мишени при протонном токе 1,8 мА измерена борным датчиком (В, С детектор). В первом эксперименте фторид магния может быть использован для измерения мощности дозы нейтронов и гамма-излучения. На рисунке 21 показано распределение дозы по глубине для нейтронов и гамма-излучения. Видно, что тепловые нейтроны, создающие радиационное поле с максимумом нейтронной дозы на глубине 10 мм, которое затем экспоненциально падает [1]. В этой работе также провели измерения в фантоме без воды. В случае без воды мощности дозы нейтронов и гамма-излучения уменьшаются линейно в зависимости от глубины (рисунок 22).

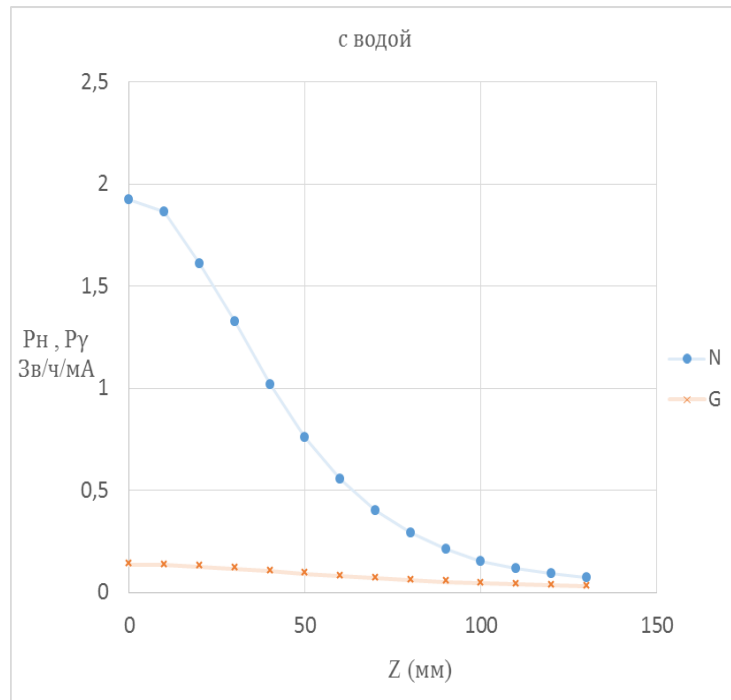


Рисунок 21. Нормированное распределение мощности дозы по глубине фантоме для нейтронов и гамма – излучения

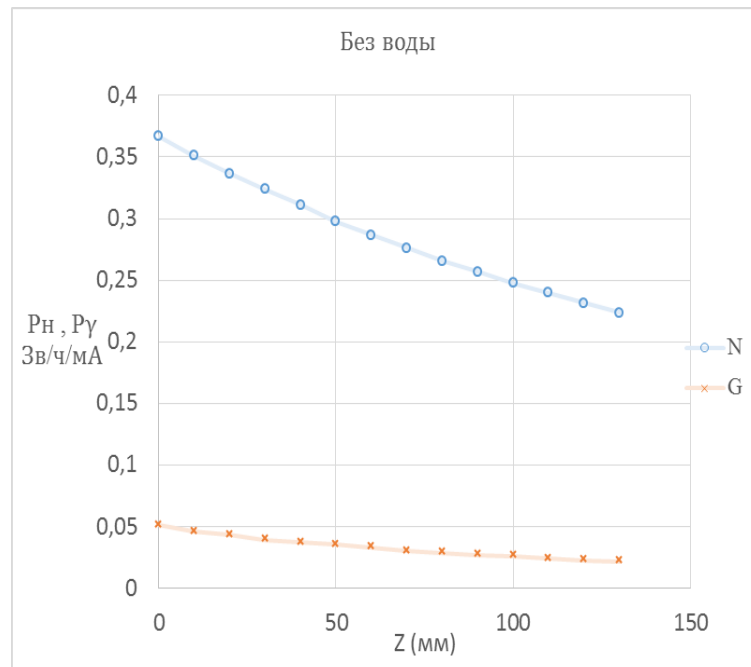


Рисунок 22. Нормированное распределение мощности дозы по глубине в фантоме без воды для нейтронов и гамма – излучения

Корреляция измерений мощности дозы :

Рядом с фантомом установлен сертифицированный гамма - дозиметр ДБГ – С 11 (Доза) , на него закреплен датчик гамма – ДБГ/ А/g. На рисунке 23 ниже показана корреляция мощности дозы гамма –излучения измерений двух датчиков .

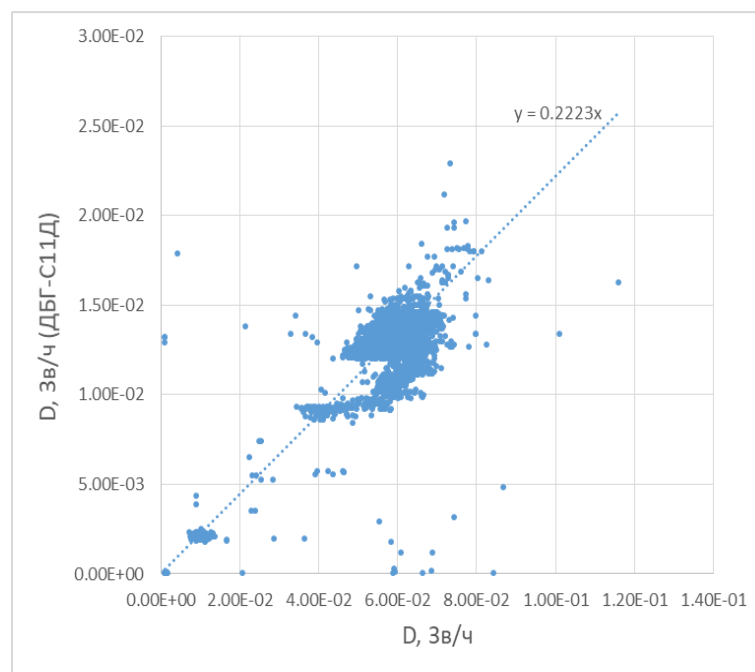


Рисунок 23. Корреляция между показаниями и мощностью дозы двух датчиков

Для большинства детекторов гамма - излучения существует прямая пропорциональность между их показаниями и мощностью дозы или плотностью потока γ - квантов .

Результаты измерения мощности дозы нейтронов и гамма – излучения для замедлителя с оргстеклом :

Во втором эксперименте оргстекло толщиной 72 мм был помещен на 14,5 см ближе к литиевой мишени . Замедлитель из оргстекла толщиной 72 мм используется для получения пучка эпитепловых нейтронов , пригодных для облучения водного фантома для развития метода БНЗТ . По сравнению с MgF_2 в системе формирования пучка , этот замедлитель обеспечивает более высокий поток нейтронов . Мощность дозы нейтронов значительно падает с увеличением глубины в фантоме , уменьшается с 4,09 до 0,44 Зв/ч /мА в диапазоне 10-80 мм (рисунок 24). Как показано на рисунке 25, мощность дозы нейтронов имеет максимальное значение на расстоянии 10 мм, а затем уменьшается .

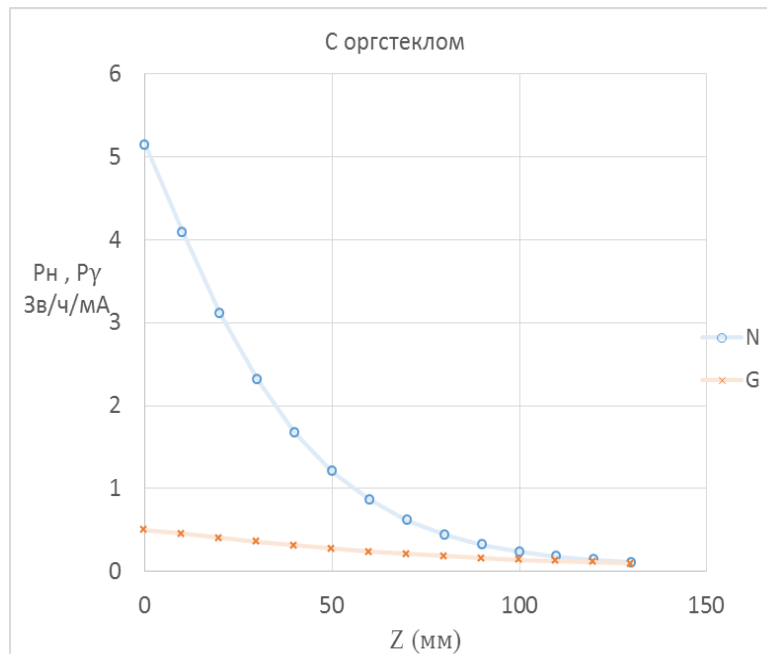


Рисунок 24. Нормированное распределение мощности дозы нейтронов и гамма – излучения по глубине в фантоме

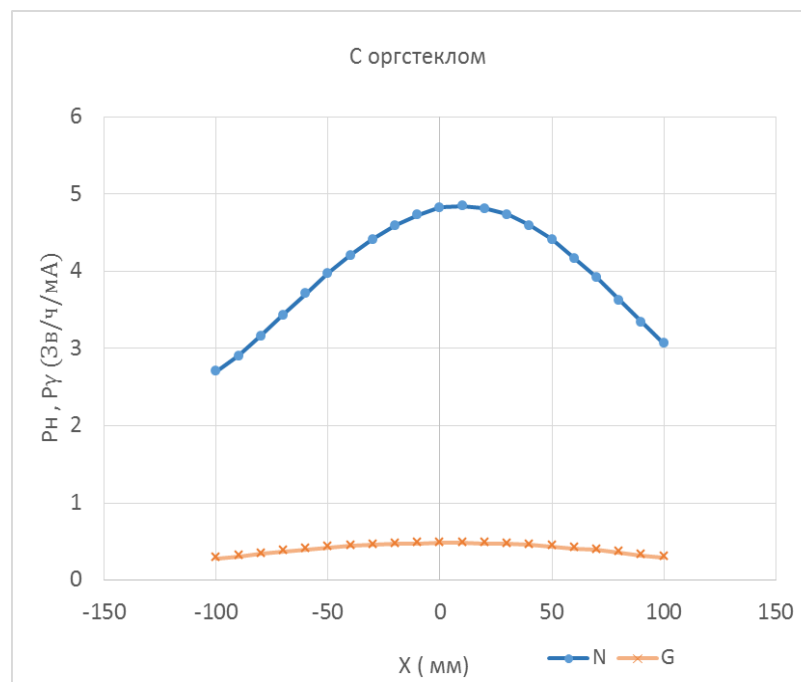


Рисунок 25. Зависимость мощности дозы нейтронов и гамма –излучения от расстояния вдоль оси X

Результаты измерения активности и мощности дозы системы формирования пучка :

Остаточная активность системы формирования пучка через 10 мин после генерации нейтронов измерена гамма - спектрометром HPGe на основе полупроводникового детектора выполненного из чистого германия. Активность определяется по характерной γ - линии изотопа, получившегося в результате активации системы формирования пучка. При измерении активности по характерной γ - линии значительно уменьшается влияние излучений сопутствующих реакций. В спектрах отчетливо видны пики с $E_\gamma = 847,46$ кэВ - основная γ линия ^{56}Mn и с $E_\gamma = 1811,60$ кэВ - γ - линия ^{56}Mn . Спектры γ - излучения системы формирования пучка представлены на рисунке 26- 27, характеристики радиоактивных изотопов, образующихся в реакции (n, γ) приведены в таблице 2 и 3.

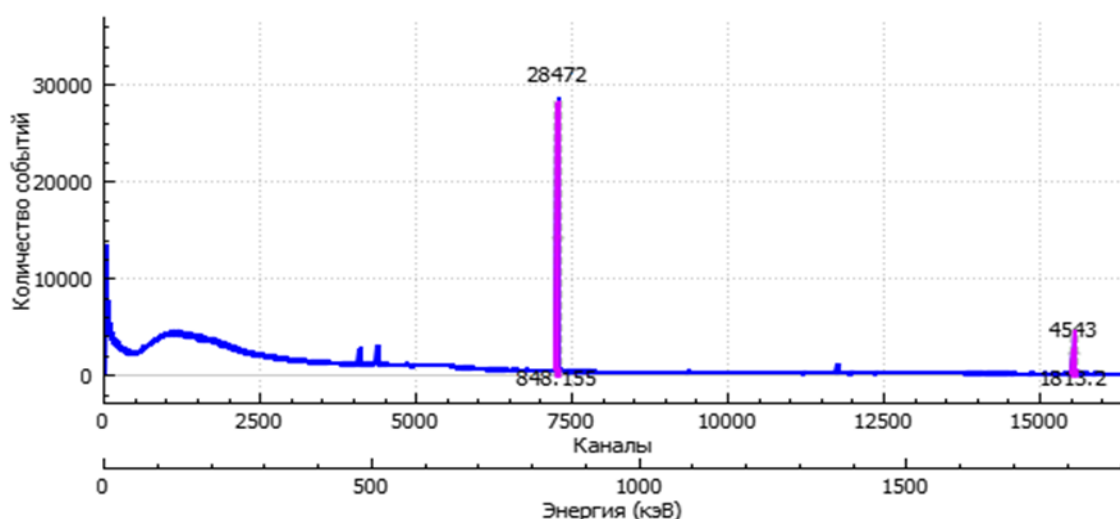


Рисунок 26. Спектр γ - излучения системы формирования пучка

Таблица 2. Характеристики радиоактивных изотопов, образующихся в реакции (n, γ)

Энергия γ - квантов	Скорость счета	Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция активации
847,46	374,19	Mn^{56}	2,579 ч	$\text{Mn}^{55}(n,\gamma) \text{Mn}^{56}$
1811,60	78,66	Mn^{56}	2,579 ч	$\text{Mn}^{55}(n,\gamma)\text{Mn}^{56}$
1369,40	14,24	Na^{24}	14,997ч	$\text{Na}^{23}(n,\gamma) \text{Na}^{24}$
511,45	40,92	Cu^{64}	12,8ч	$\text{Cu}^{63}(n,\gamma) \text{Cu}^{64}$
478,03	19,70	Be^7	53,3сут	$\text{Li}^7(p,n) \text{Be}^7$

На следующее утро в спектре измеренном еще раз, выявилась γ линия ${}^7\text{Be}$ с $E_\gamma = 478$ кэВ.

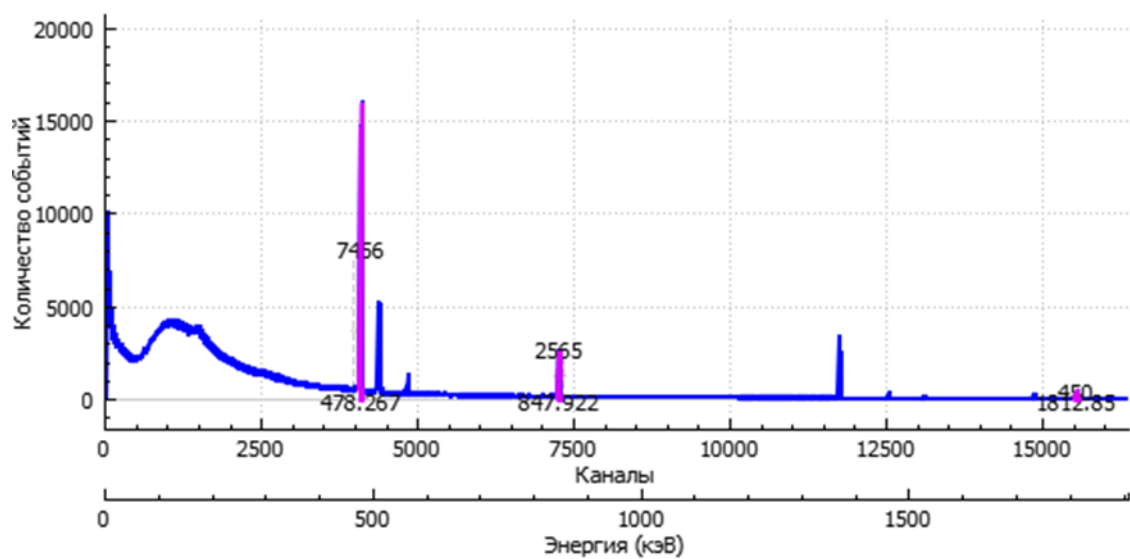


Рисунок 27. Спектр γ -излучения, измеренный еще раз

Таблица 3. Характеристики радиоактивных изотопов, образующихся в реакции (n, γ)

Энергия γ -квантов	Скорость счета	Изотоп	$T_{1/2}$	Реакция активации
847,22	4,04	Mn^{56}	2,579 ч	$\text{Mn}^{55}(\text{n},\gamma) \text{Mn}^{56}$
1811,25	0,84	Mn^{56}	2,579 ч	$\text{Mn}^{55}(\text{n},\gamma)\text{Mn}^{56}$
1369,17	6,66	Na^{24}	14,997ч	$\text{Na}^{23}(\text{n},\gamma) \text{Na}^{24}$
511,33	13,16	Cu^{64}	12,8ч	$\text{Cu}^{63}(\text{n},\gamma) \text{Cu}^{64}$
477,91	22,37	Be^7	53,3сут	$\text{Li}^7(\text{p},\text{n}) \text{Be}^7$
564,42	1,31	Sb^{122}	2,70 сут	$\text{Sb}^{121}(\text{n},\gamma) \text{Sb}^{122}$
1461,38	0,59	K^{40}	$1,28 \cdot 10^9$ лет	-

Измерена мощность дозы системы формирования пучка нейтронов гамма дозиметром (ДБГ-С11Д) в течении 18 часов после генерации нейтронов. После прекращения облучения в течение 18 часов величина мощности дозы уменьшается (рисунок 28).

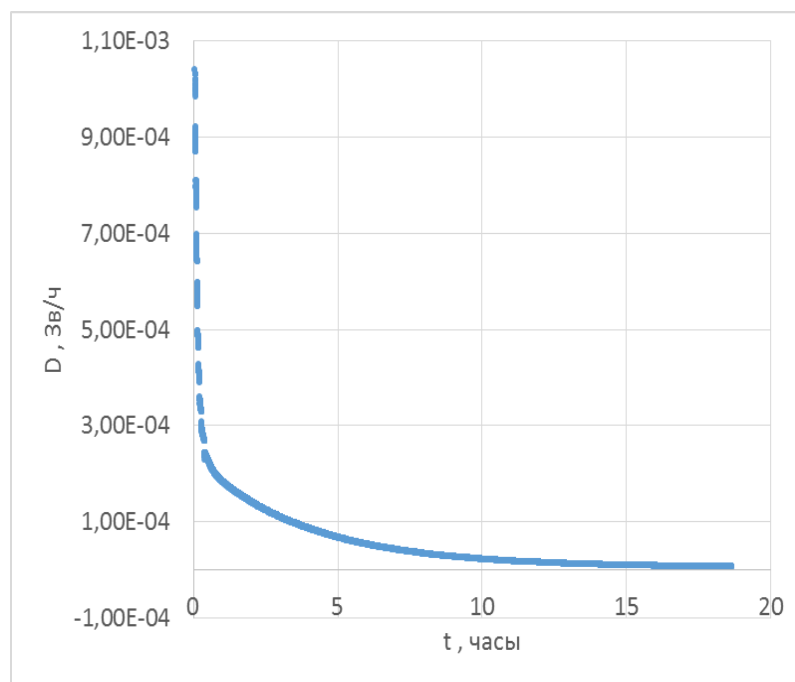


Рисунок 28. Зависимость мощности дозы системы формирования пучка от времени

Результаты определения мощности дозы нейтронов и гамма – излучения при разных энергиях :

При разных энергиях 2,1 МэВ и 2,2 МэВ провели измерения распределения нейтронов и гамма – излучения по глубине фантома Z (0, 130) с использованием фторида магния , бор – содержащих датчиков . Результаты опытов по отдельному определению мощности дозы нейтронов и γ - излучения в фантоме к току ~ 1 мА и времени облучения 1 час представлены на рисунке 29 и 30. По мере дальнейшего увеличения глубины распределение дозы нейтронов уменьшается по экспоненциальному закону . Характерным признаком кривых , изображающих распределение дозы нейтронного излучения и гамма – излучения в фантоме при облучении фантома потоками эпитепловых нейтронов в зависимости от глубины, является наличие максимума на небольшой глубине облучаемого объекта. Для нейтронов и γ - излучения при энергии протонов 2,2 МэВ мощность дозы может отличаться измеренной дозы при энергии 2,1 МэВ более чем в 1,5 раза .

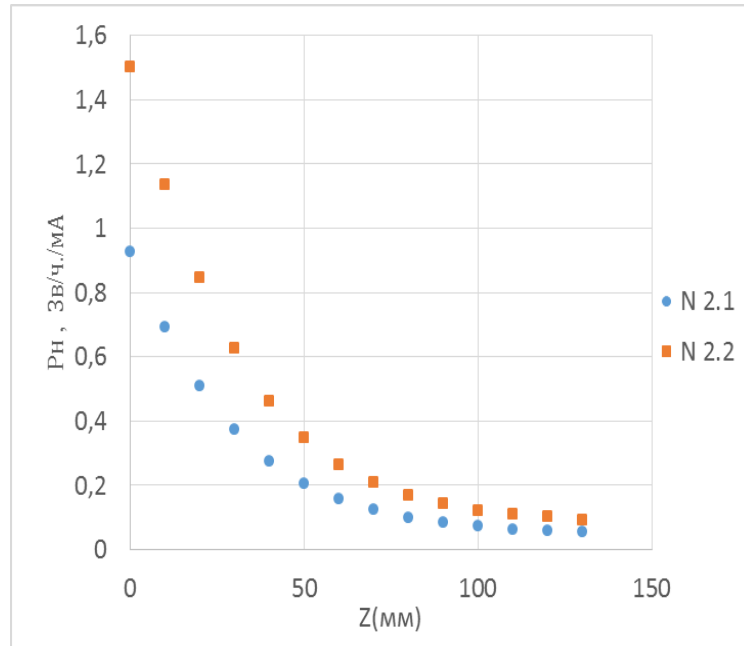


Рисунок 29. Сравнение нормированного распределения мощности дозы нейтронов по глубине Z при энергиях 2,1МэВ и 2,2 МэВ

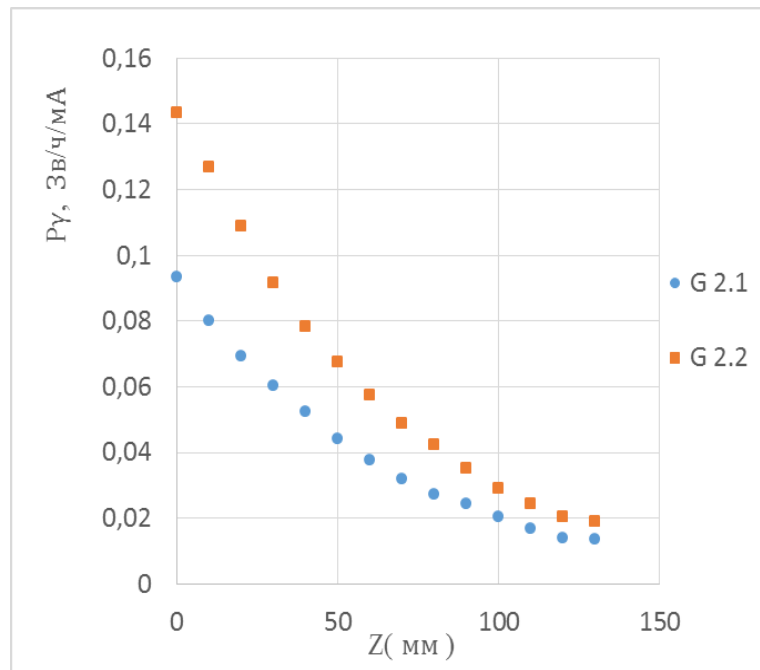


Рисунок 30. Сравнение нормированного распределения мощности дозы гамма – излучения по глубине Z при энергиях 2,1МэВ и 2,2 МэВ

Результаты, рассчитанные методом Монте – Карло:

Расчеты для мощности дозы бора и гамма –излучения при энергии протонов 2,07 МэВ к току 1 мА и времени облучения 1 час проведены программой NMC моделирования переноса нейтронов Монте – карло [22,23] . На моделировании рассчитаны спектры захвата нейтронов в бор- содержащих детекторах .

Борная доза : это составляет так называемую терапевтическую дозу , которая исходит от ЛПЭ заряженных частиц , образующихся при захвате тепловых нейтронов B^{10} . Гамма доза : присутствуют фотоны с энергией 0,48 МэВ , образующиеся захватом бора . На рисунках 31 - 34 приведены рассчитанные по методу Монте - Карло мощности борных доз и гамма - дозы на расстояниях Z (0, 19) , X (-10 , 9,5) для замедлителя с MgF_2 . Как видно из 31 рисунка большое значение мощности борной дозы наблюдается у фантома с глубиной 2 см .

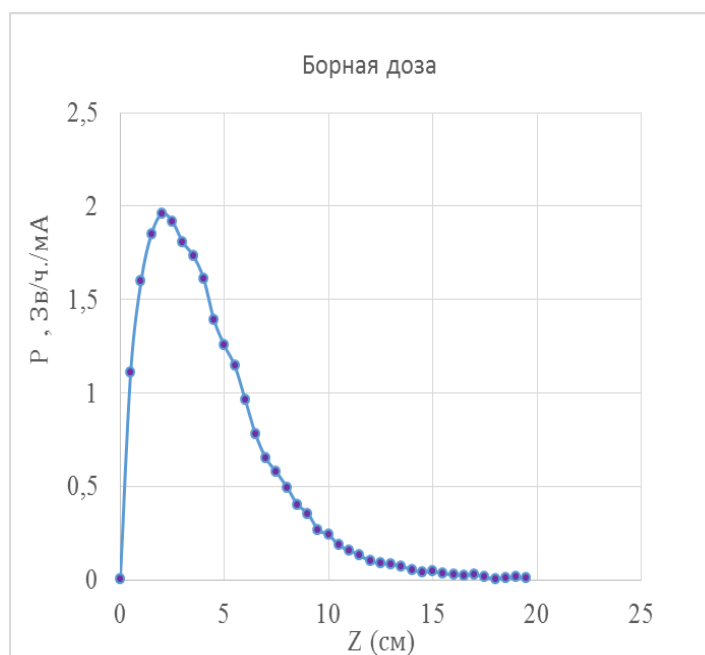


Рисунок 31. Зависимость мощности борной дозы от глубины фантома
 Мощности борной дозы и гамма – излучения на расстояниях вдоль оси X (-10 , 9,5) совпадают с дозами первых экспериментальных измерений (рис 32 и 34).

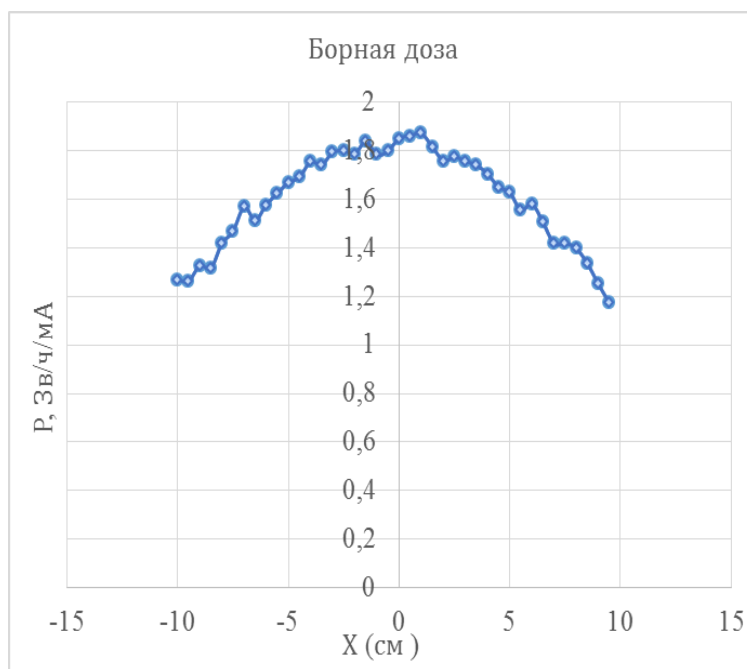


Рисунок 32 . Распределение борной дозы по расстоянию X см
 Мощность дозы для гамма – излучения изменяется от 0,24 на глубине 3см до 0,02 на глубине от 19 см .

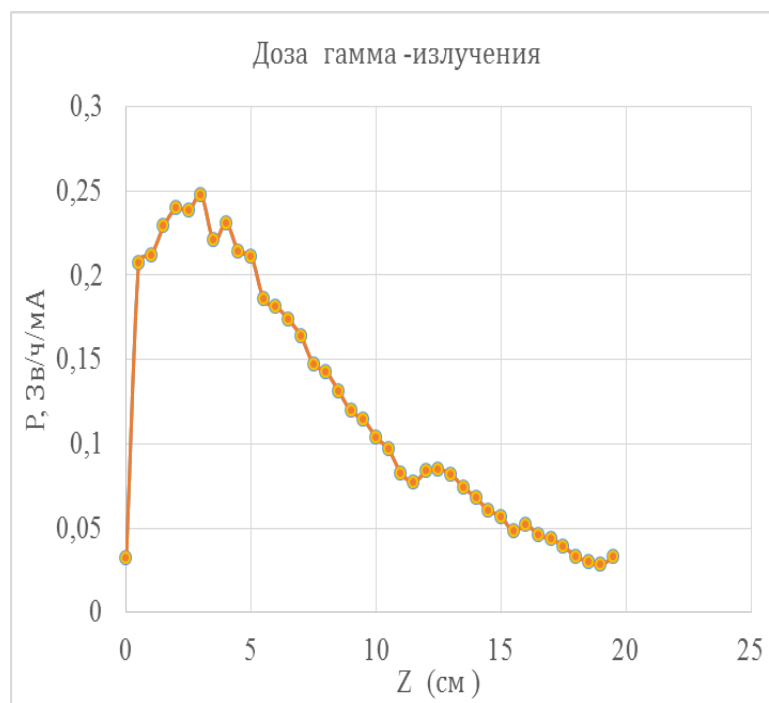


Рисунок 33 . Распределение дозы гамма – излучения по глубине
 водного фантома

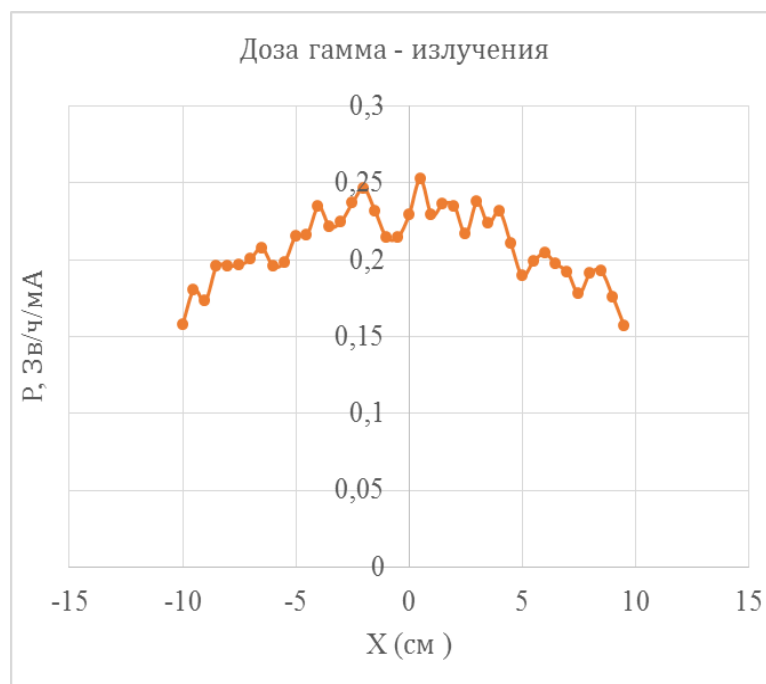


Рисунок 34. Распределение дозы гамма – излучения по расстоянию оси X фантома

Распределения многочисленных измерений, выполненных авторами при исследовании водного фантома, выше показали, что мощности дозы нейтронов определенные с помощью борного датчика согласуются с рассчитанными значениями распределения борной дозы по глубине Z (0, 19,5) и по расстоянию X(-10, 9,5) для замедлителя из оргстекла (рис 35 и 37).

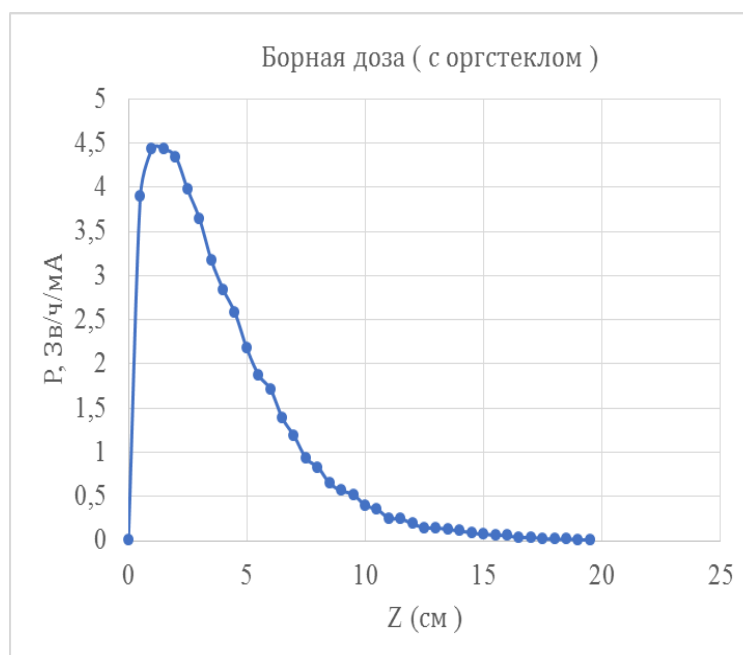


Рисунок 35. Распределение борной дозы по глубине фантома

Мощность дозы гамма –излучения может уменьшаться от 0,9 до 0,1 в зависимости от глубины Z.

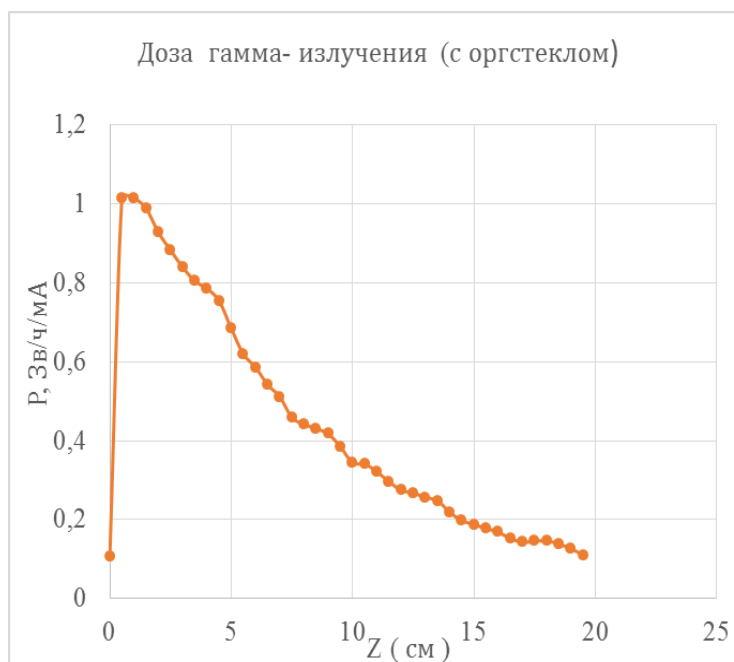


Рисунок 36. Распределение дозы гамма – излучения по глубине фантома

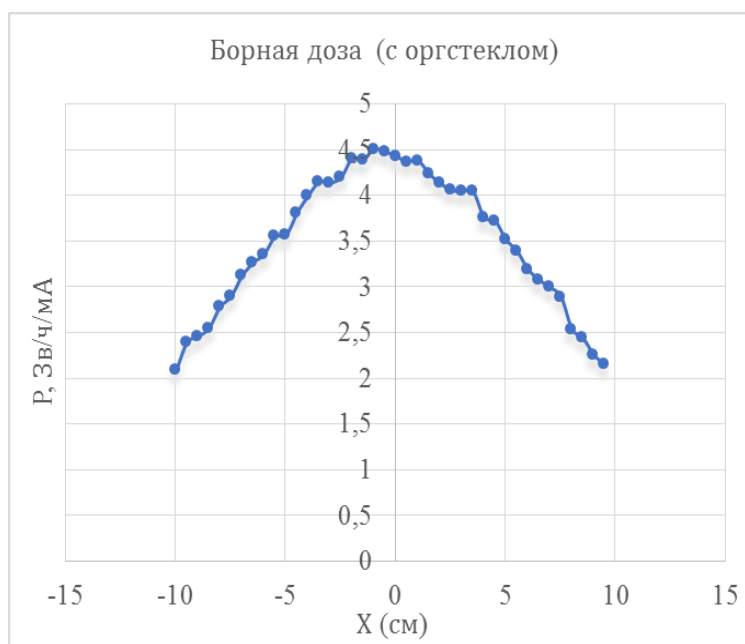


Рисунок 37. Распределение борной дозы по расстоянию вдоль оси X

Расчет показал , что распределение мощности дозы гамма – излучения по расстоянию вдоль оси X зависит от геометрических размеров фантома . Данное распределение

дозы гамма – излучения в водном фантоме в зависимости от X имеет максимум на некотором расстоянии облучаемого объекта (рис 38).

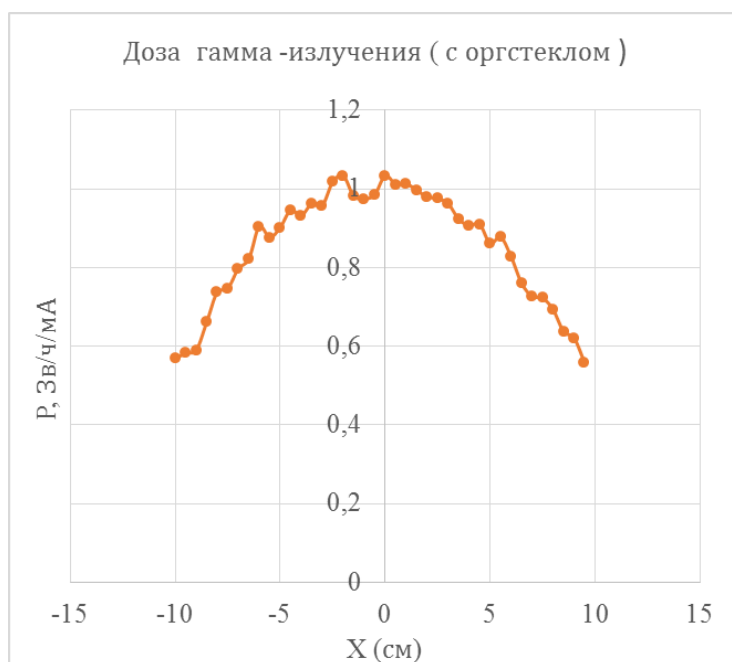


Рисунок 38 . Распределение дозы гамма – излучения по расстоянию вдоль оси X

На таблице 4 приведены стандартные отклонения мощности дозы бора , нейтронов и гамма – излучения положением глубины для энергии протонов 2,07 МэВ .

Таблица 4. Стандартные отклонения мощности дозы бора , нейтронов и гамма – излучения от глубины для энергии протонов 2,07 МэВ

	σ_b, σ_n	σ_γ
Эксперимент (MgF_2)	$0,7 \pm 0,68$	$0,08 \pm 0,04$
Моделирование (MgF_2)	$0,6 \pm 0,67$	$0,11 \pm 0,07$
Эксперимент (оргстекло)	$1,4 \pm 1,5$	$0,2 \pm 0,1$
Моделирование (оргстекло)	$1,2 \pm 1,5$	$0,4 \pm 0,3$

Заключение

В работе приведено описание основ БНЗТ, этап ее развития и представлено состояние разработки ускорительного источника эпитепловых нейтронов на основе нового типа ускорителя заряженных частиц – ускорителя тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишенью, обеспечивающей оптимальное качество терапевтического пучка нейтронов.

Основные результаты научно – квалификационной работы (диссертации) следующие:

1. Создан цилиндрический активационный детектор с использованием реакции $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ для измерения плотности потока нейтронов в эпитепловом диапазоне энергий предложен и оптимизирован методом моделирования Монте – Карло.

2. Методом численного моделирования переноса нейтронов показано, что детектор чувствителен к эпитепловым нейтронам и имеет плоскую кривую чувствительности в диапазоне эпитепловых нейтронов в то время как его чувствительность к тепловым и быстрым нейтронам низкая.

3. Отмечено, что нами рассчитанная эффективность детектора отличается от расчетной эффективности оригинального детектора. Сделаны предположения о возможных причинах различия значений эффективности и предложены способы их устранения. Также предложено оснастить детектор титановым рассеивателем, еще сильнее уменьшающим чувствительность детектора к быстрым нейтронам. Показано, что сравнение сигналов детектора без титанового рассеивателя и детектора с титановым рассеивателем позволяет оценить компоненту нейтронов с энергией в районе 10 кэВ, оптимальных для терапии глубокоосидающих опухолей.

4. Используя гамма - дозиметр совместно с борсодержащим датчиком анализировали радиационные поля смешанного излучения, т.е. определить отдельно показания мощности дозы γ - излучения и нейтронов. Было показано, что спектр дозы нейтронов и гамма – излучения, полученный с помощью такого третьего датчика зависит от положения X, Y, Z фантома.

Измерены остаточную активность и мощность дозы системы формирования пучка после генерации нейтронов .

Пространственное распределение нейтронов и γ - излучения в водном фантоме при различных энергиях экспериментально определено с помощью детектора на основе сцинтиллятора .

5. Показаны расчетные результаты моделирования переноса нейтронов методом Монте – Карло , выполненным программой NMC по сравнению с экспериментальным данным значением.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Бурдакову Александру Владимировичу и Ведущему научному сотруднику Сергею Юрьевичу Таскаеву за помощь в выборе направления данной работы, постоянную поддержку и внимание к исследованиям.

Особую признательность автор выражает коллегам по экспериментам на установке БНЗТ: Касатов Д.А., Быкову Т.А., Сычева В.Т., Кошкарёву А.М, Макарову А.Н, Щудло И.М., Колесникову Я.А, Соколовой Е.О, Савинов С.С., за ценные обсуждения, содействие и помощь в проведении экспериментов , а также в подготовке научной работы .

Список литературы

1. Купленников Э.Л., Довбня А.Н. Пучки нейтронов для терапии . Харьков : ННЦ ХФТИ , 2011. - 31с .
2. Таскаев С.Ю., Каныгин В.В. Бор-нейтронозахватная терапия. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. – 216 с.
3. Sauerwein W., Wittig A., Moss R., Nakagawa Y. (editors). Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. – Springer, 2012. – 553 p.
4. Dymova M ., Taskaev S.Yu., Richter V., Kuligina E. Boron neutron capture therapy: current status and future perspectives // Cancer Communications.- 2020-40 –P.406-421.
5. Guan X.C., Gong Y., Murata I., Wang T.S. The new design and validation of an epithermal neutron flux detector using $^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$ reaction for BNCT// Journal of Instrumentation. – 2019. - V.14. - P06016.
6. Nuclear Reaction Data Library ENDF/B-VII.
7. Yurov D., Anikeev A., Brednikhin S., Frolov S., Lezhnin S., Prihodko V. Parameters optimization in a hybrid system with a gas dynamic trap based neutron source// Fusion Eng. - Fusion Eng. 2012. - Des. 87.- P.1684-1692.
8. Taskaev S., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov Ia., Makarov A., Ostreinov G., Savinov S., Sokolova E. Cross-section measurement for the $^7\text{Li}(p,\alpha)^4\text{He}$ reaction at proton energies 0.6 - 2 MeV// Nuclear Inst. and Methods in Physics Research.- 2022. - В .525. -P.55-61.
9. Fujimoto N., Tanaka H., Sakurai Y., Takata T., Kondo N., Narabayashi M., Nakagawa Y., Watanabe T., Kinashi Y., Masunaga S., Maruhashi A., Ono K., Suzuki M. Improvement of depth dose distribution using multiple-field irradiation in boron neutron capture therapy// Applied Radiation and Isotopes- 2015. –V.106. - P.134- 138.
10. Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., Bykov T., Kasatov D., Kolesnikov I., Koshkarev A., Makarov A., Ostreinov G., Porosev V., Savinov S., Shchudlo I., Sokolova E., Sorokin I., Sycheva T., Verkhovod G. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target.// Biology 10.- 2021.- V.350.

11. Lee C.L., Zhou X.L. Thick target neutron yields for the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ reaction near threshold// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. -1999. – В. 152. – P.1-11.
12. Murata I., Tamaki S . Techniques to measure absolute neutron spectrum and intensity for accelerator based neutron source for BNCT// Plasma and fusion research overview articles . – 2018. - V. 13. - 2501007 .
13. Аваев В.Н., Васильев Г.А. Экспериментальные исследования полей гамма - излучения и нейтронов . Москва : Атомиздат , 1974. - 392 с .
14. Юдин М.Ф., Фоминых В.И. Нейтронная дозиметрия. Москва : Издательство государственного комитета стандартов МЕР и измерительных приборов СССР , 1964 .
15. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. Москва : Энергоатомиздат , 1986. – 464с.
16. Фюнфер Э., Нейерт Г. Счетчики излучений : литературы в области атомной науки и техники. - Москва : Государственное издательство, 1961 .
17. Vykov T. A. Evaluation of depth – dose profiles in a water phantom at the BNCT facility at BINP // JINST. - 2021. – V.16. - P 10016 .
18. Vykov T. A. Initial trials of a dose monitoring detector for boron neutron capture therapy // JINST . - 2021 . - V. 16.- PO 1024 .
19. Zaidi L. Beam shaping assembly design of ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ neutron source for boron neutron capture therapy of deep - seated tumor // Applied Radiation and Isotopes . – 2018. – V.139 .P 316 .
20. Taskaev S., Berendeev E. Neutron source based on vacuum insulated tandem accelerator and lithium target // Biology 10 .- 2021. P. 350 .
21. Tanaka K. Dose distributions in a human head phantom for neutron capture therapy using moderated neutrons from the 2,5 MeV proton – ${}^7\text{Li}$ reaction or from fission of ${}^{235}\text{U}$ // Phys . Med . Biol. - 2001 . 462681 .
22. Бреднихин С. А ., Лежнин С.И. Код NMC для статистичес-кого моделирования переноса нейтронов в делящихся средах. Валидация и приложения : Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2012-04. — М. : ИБРАЭ РАН, 2012. — 24 с.
23. Yurov D. V., Anikeev A.V., Bagryansky P.A. Parameters optimization in a hybrid system with a gas dynamic trap based neutron source// Fusion Engineering and Design . - 2012 .V.87 . P – 1684- 1692 .

