

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384, 539.1.07, 539.1.03

ЗАМЕДЛИТЕЛЬ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА С ОБЪЕМНЫМ ВКРАПЛЕНИЕМ ВИСМУТА ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

© 2026 г. Т. А. Быков^а, Г. Д. Верховод^а, И. С. Ибрагим^а, Д. А. Касатов^{а, б},
Е. О. Соколова^{а, б, с}, Т. В. Шейн^{а, б}, С. В. Щукин^б, С. Ю. Таскаев^{а, б, с, *}

^а Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^б Новосибирский государственный университет
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

^с Государственный университет “Дубна”
Российская Федерация, 141982, Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19

* E-mail: taskaev@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 10.10.2025

После доработки 14.10.2025

Принята к публикации 17.11.2025

Для бор-нейтронозахватной терапии — перспективной методики лечения злокачественных опухолей — требуются интенсивные пучки нейтронов эпитеплового диапазона энергий. На ядерных реакторах или ускорителях заряженных частиц генерируют нейтроны с большей энергией и замедляют их до требуемой энергии за счет упругого и неупругого рассеяний нейтронов на атомных ядрах вещества замедлителя. Для терапии глубоко локализованных опухолей оптимальны нейтроны с энергией в районе 10 кэВ, и для получения такого пучка нейтронов применяется система формирования пучка с замедлителем из кристаллического или прессованного фторида магния. Для проведения научных исследований с органическими образцами и лабораторными животными используется водородосодержащий замедлитель (оргстекло, полиэтилен); в данном случае энергетический спектр нейтронов смещен в тепловую область. Мы предложили использовать замедлитель из полиэтилена с объемным вкраплением висмута. Представлены результаты измерения пространственного распределения интенсивности ядерных реакций поглощения нейтронов ядрами бора и интенсивности γ -излучения в водном фантоме для трех подобных замедлителей, изготовленных из оргстекла, полиэтилена и полиэтилена с объемным вкраплением висмута. Измерения проведены малогабаритным датчиком с парой литевых полистирольных сцинтилляторов, один из которых обогащен бором. Показано, что использование полиэтилена с объемным вкраплением висмута по сравнению с оргстеклом или полиэтиленом уменьшает нежелательную дозу γ -излучения при сохранении интенсивности нейтронного потока.

DOI: 10.7868/S3034564226020161

1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективной методикой лечения злокачественных опухолей считается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) [1, 2], обеспечивающая избирательное уничтожение клеток опухоли путем накопления в них бора и последующего облучения нейтронами. В результате поглощения нейтрона ядром бора происходит ядер-

ная реакция с большим выделением энергии в клетке опухоли, что приводит к ее гибели.

В настоящее время методика БНЗТ начинает входить в клиническую практику: лечение проводят в Японии, клинические испытания проводят в Японии, Китае, Южной Корее, Финляндии и скоро начнут в России. Во всех клиниках для генерации нейтронов используют ускорители заряженных частиц с бериллиевой или литие-

вой мишенью. Терапевтический пучок нейтронов эпитеплового диапазона энергий получают, применяя систему формирования пучка с замедлителем из фторида магния.

Для проведения научных исследований с органическими образцами и лабораторными животными можно использовать и используют нейтроны теплового диапазона энергий. В этом случае для их получения эффективнее использовать водородосодержащий замедлитель (оргстекло, полиэтилен): из-за быстрого торможения нейтронов толщина замедлителя меньше и, как следствие, интенсивность потока нейтронов выше. Для уменьшения дозы γ -излучения мы предлагаем использовать замедлитель из полиэтилена с объемным вкраплением висмута.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проведены в Институте ядерной физики СО РАН на ускорительном источнике нейтронов VITA [3]. Схема установки приведена на рис. 1. Установка состоит из электростатического тандемного ускорителя заряженных частиц оригинальной конструкции (ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией)

для получения стационарного моноэнергетичного пучка протонов или дейтронов с энергией до 2.3 МэВ, током до 10 мА, литиевой мишени для генерации нейтронов с выходом до $2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ и ряда систем формирования пучка нейтронов для получения пучка холодных, тепловых, эпитепловых или быстрых нейтронов.

При проведении данного исследования мы использовали пучок протонов с энергией 2.1 МэВ и током 1 мА. Литиевая мишень размещалась в горизонтальном тракте в положении В. Вплотную к мишени размещался один из трех изготовленных замедлителей: оргстекло, полиэтилен или полиэтилен с объемным вкраплением висмута. Далее с зазором 5 мм к замедлителю размещали водный фантом. На перемещаемой площадке фантома рядом закреплялись два датчика для измерения интенсивности потока нейтронов и γ -излучения.

Все замедлители изготовлены в виде дисков диаметром 155 мм. Толщина дисков из оргстекла и из полиэтилена с объемным вкраплением висмута равна 72 мм, толщина диска из полиэтилена составляет 52 мм.

Диск из полиэтилена с объемным вкраплением висмута изготовлен из порошка полиэти-

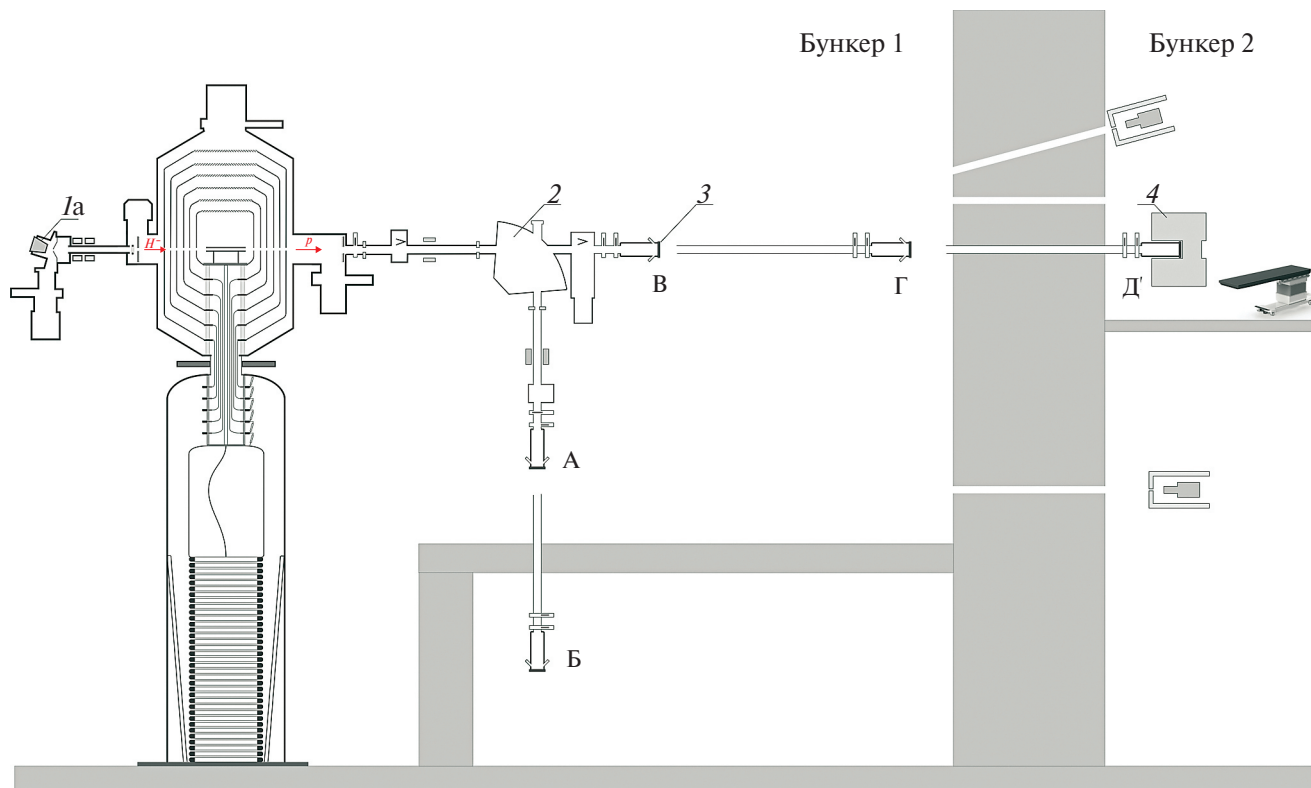


Рис. 1. Схема ускорительного источника нейтронов VITA: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 2 – поворотный магнит, 3 – литиевая нейтроногенерирующая мишень, 4 – система формирования пучка нейтронов с замедлителем из фторида магния. Литиевая мишень размещается в положениях А, Б, В, Г или Д

лена и порошка высокочистого висмута ВИ-00 методом литья пластмасс под давлением в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН. Этот замедлитель аналогичен материалу Poly-Biz [4], производимому компанией Shieldwerx (США) и используемому для защиты от γ -излучения; плотность атомных ядер водорода в нем считается равной $5.39 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, плотность атомных ядер висмута составляет $6.6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Толщина дисков замедлителя выбрана таким образом, чтобы все замедлители формировали пучок нейтронов со схожим энергетическим спектром. Поскольку замедление нейтронов обеспечивается преимущественно за счет их упругого рассеяния на атомных ядрах водорода, толщина замедлителя подбиралась таким образом, чтобы получить в них примерно одинаковую линейную плотность атомных ядер водорода. Получилось, что в изготовленном замедлителе из оргстекла плотностью 1.18 г/см^3 линейная плотность атомных ядер водорода равна $4.08 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$, в замедлителе из полиэтилена с объемным вкраплением висмута она на 5 % меньше ($3.88 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$), а в замедлителе из полиэтилена плотностью 0.94 г/см^3 — на 3 % больше ($4.20 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$).

Водный фантом — это сосуд в форме параллелепипеда размером $330 \times 330 \times 315 \text{ мм}^3$, заполненный водой, с площадкой, перемещаемой в трех направлениях. Сосуд изготовлен из монолитного поликарбоната. Передняя стенка сосуда, прислоняемая к замедлителю, сделана из тонкой мембраны из полиэтилентерефталата толщиной 0.5 мм. Толщина всех остальных стенок из поликарбоната составляет 8 мм, толщина дна равна 16 мм.

Для измерения интенсивности излучения мы использовали разработанный малогабаритный

датчик с парой литевых полистирольных сцинтилляторов, один из которых обогащен бором [5]. Размер чувствительного элемента датчика равен примерно 1 мм^3 . Световой сигнал от датчика по оптоволоконному кабелю попадал на микропиксельный лавинный фотодиод, и электроника регистрации инкрементировала счетчик событий при превышении сигналом порога на уровне нескольких оптических фотонов. Величину потока нейтронов мы определяли через разность счета между двумя датчиками. Поскольку сигнал нейтронного потока обусловлен поглощением нейтронов ядрами бора, аналогично процессу в БНЗТ, будем считать этот сигнал “борной” дозой — одной из четырех компонент дозы, рассматриваемых в БНЗТ. Доза γ -излучения определялась через разность счета в канале детектора со сцинтиллятором без бора и в канале без сцинтиллятора, но с оптоволоконным кабелем, поскольку это позволяет исключить вклад черенковского излучения, образующегося в оптоволокне.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении исследований энергия пучка протонов равна $2.100 \pm 0.002 \text{ МэВ}$, ток пучка протонов поддерживался на уровне от 0.98 мА до 1.1 мА со стабильностью от 0.3 до 1.5 %. Характерные глубинные и радиальные распределения скорости счета датчиков, нормированные на единицу тока пучка протонов величиной 1 мА, с применением замедлителя из полиэтилена с объемным вкраплением висмута приведены на рис. 2, 3. При использовании других замедлителей распределения аналогичны.

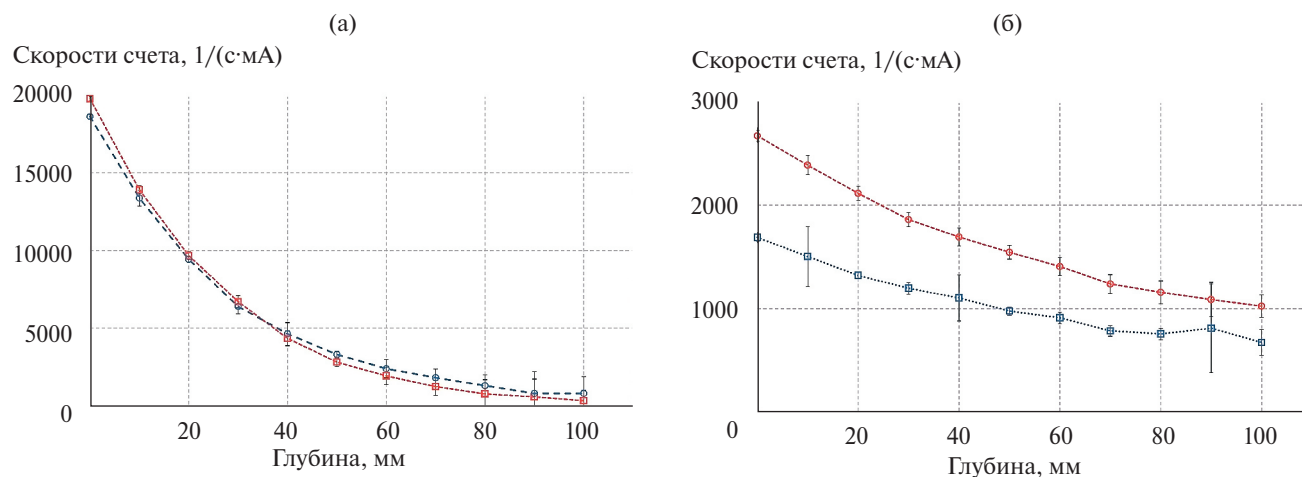


Рис. 2. Распределения скорости счета по глубине для датчика нейтронов (а) и датчика γ -излучения (б), нормированные на ток пучка протонов величиной 1 мА

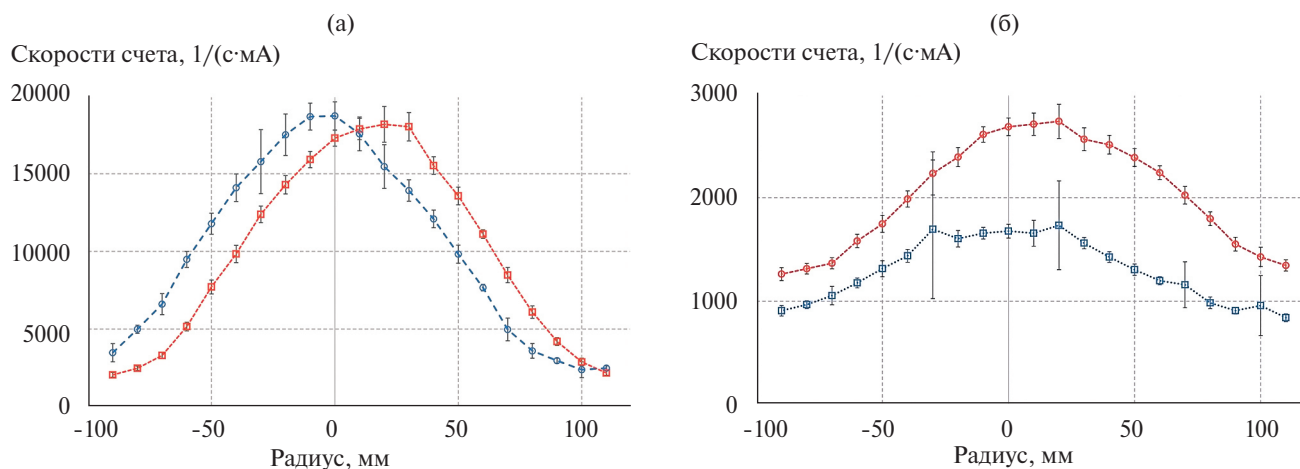


Рис. 3. Радиальные распределения скорости счета датчика нейтронов (а) и датчика γ -излучения (б), нормированные на ток пучка протонов величиной 1 мА

Видно, что интенсивность излучения уменьшается с глубиной: так, регистрируемая интенсивность потока нейтронов уменьшается в 2 раза на глубине 2 см, интенсивность γ -излучения уменьшается в 2 раза на глубине 7 см. Ширина на полувысоте радиального распределения интенсивности потока нейтронов равна 11 см, γ -излучения — примерно 15 см.

При проведении исследований установлено, что реализованное крепление датчиков к подвижной каретке водного фантома не обеспечивало желаемой точности их положения при движении каретки, а именно: при возвращении датчика в исходное положение его реальное положение могло отличаться на расстояние порядка 1 мм, и это приводило к различающимся результатам при измерении. Причина состоит в том, что мы помещали все три оптоволоконных кабеля каждого датчика в светонепроницаемую пластиковую трубку, и все эти три трубки вместе винтами не очень жестко, стремясь не повредить оптоволоконные кабели, прижимали к подвижной каретке водного фантома, направляя трубки вверх и придерживая их над водной поверхностью фантома крюком кран-балки.

Более точные результаты для сравнения параметров излучения при использовании разных замедлителей получены, когда мы не смещали датчик, а заменяли замедлители. Именно для этой процедуры был оставлен зазор в 5 мм между поверхностью замедлителя и стенкой водного фантома. При использовании более тонкого замедлителя из полиэтилена мы аккуратно придвинули водный фантом в направлении к литиевой мишени на 20 мм. Измерения для сравнения замедлителей одинаковой толщины

проводились в нескольких точках размещения датчика вблизи максимального сигнала; измерения для сравнения тонкого замедлителя с более толстыми замедлителями проводились в одной точке максимального сигнала.

Из двух используемых датчиков один давал более стабильные показания, и именно его показания мы анализировали далее.

Нейтронный датчик настроен таким образом, что при отсутствии нейтронов он выдавал отрицательный сигнал на уровне 100 с^{-1} . Хотя такая сдвигка нулевого сигнала мала (на уровне 0.5 % от анализируемого сигнала), мы ею не пренебрегали, а учитывали. На рис. 4а приведен график зависимости скорости счета нейтронного датчика от энергии пучка протонов в диапазоне 1.0–1.85 МэВ при использовании замедлителей из оргстекла и полиэтилена с объемным вкраплением висмута. Следует указать, что при этих значениях энергии протонов генерация нейтронов не происходила; порог реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ равен 1.882 МэВ. Видно, что скорость счета нейтронного датчика при отсутствии нейтронов не зависит от энергии протонов и используемого замедлителя. Усреднив все эти значения, мы получим значение, равное -130 ± 20 ; его мы будем вычитать из показаний нейтронного датчика при генерации нейтронов для определения борной дозы.

С определением нулевого сигнала показания датчика γ -излучения ситуация немного сложнее. Нас интересовало γ -излучение, производимое нейтронами в результате их взаимодействия с атомными ядрами конструкционных материалов мишенного узла, замедлителя и водного фантома, например в виде фотонов с энергией

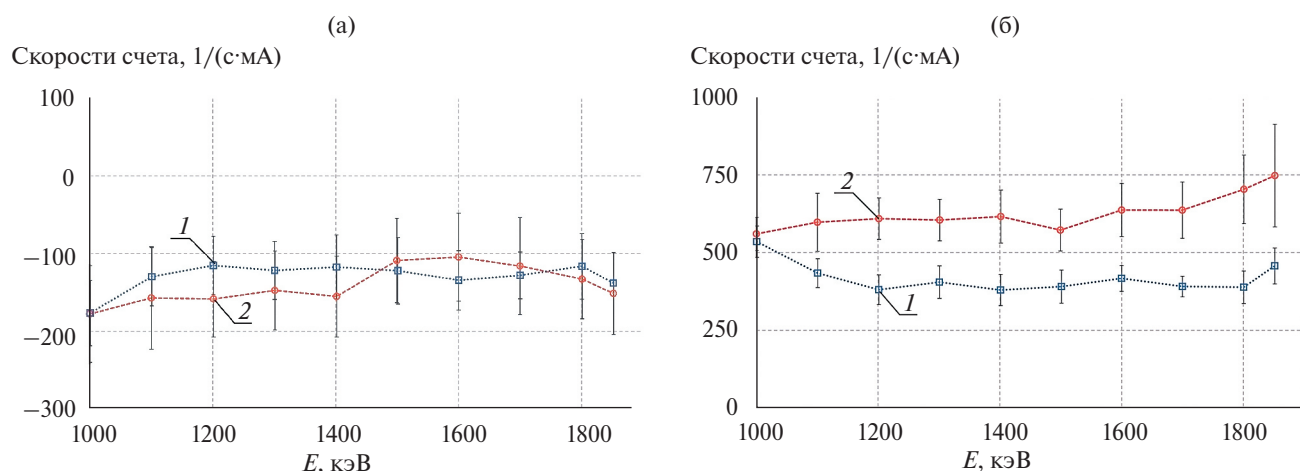


Рис. 4. Зависимости скорости счета нейтронного датчика (а) и датчика γ -излучения (б) от энергии пучка протонов E при использовании замедлителей из полиэтилена с объемным вкраплением висмута (1) и из оргстекла (2)

2.2 МэВ, образующихся в реакции $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$, и заметно меньшее по интенсивности излучение фотонов с энергией 478 кэВ, генерируемых в результате неупругого рассеяния протонов на атомных ядрах лития в реакции $^7\text{Li}(p, p', \gamma)^7\text{Li}$ [6]. Но в проводимых исследованиях датчик регистрировал не только интересующее нас излучение, но и тормозное излучение ускорителя. Для измерения вклада тормозного излучения ускорителя мы провели измерения при исключении генерации нейтронов. На рис. 4б приведена зависимость скорости счета датчика γ -излучения от энергии пучка протонов в диапазоне 1.0–1.85 МэВ при использовании замедлителей из оргстекла и полиэтилена с объемным вкраплением висмута. Видно, что скорость счета слабо зависит от энергии и зависит от используемого замедлителя. Тормозное излучение ускорителя вызвано преимущественно торможением электронов, образующихся в ускорительном канале ускорителя, в конструкционных материалах газовой обдирочной мишени, размещенной внутри высоковольтного электрода ускорителя. При увеличении напряжения высоковольтного электрода увеличивается энергия электронов и, как следствие, интенсивность тормозного излучения, но одновременно уменьшается поток электронов из-за меньшего сечения ионизации остаточного газа ускоренными ионами. Этим эффектом может объясняться слабая зависимость скорости счета детектора γ -излучения от напряжения ускорителя (напряжение высоковольтного электрода в два раза меньше энергии протонов за вычетом начальной энергии инжектируемого в ускоритель пучка отрицательных ионов водорода). Такая слабая зависи-

мость позволяет экстраполировать значения на энергию 2.1 МэВ и получить следующие значения интенсивности тормозного излучения: 630 ± 20 при использовании замедлителя из оргстекла и 420 ± 30 при использовании замедлителя из полиэтилена с объемным вкраплением висмута. Меньшее значение регистрируемой интенсивности тормозного излучения при использовании замедлителя из полиэтилена с объемным вкраплением висмута естественно объясняется наличием висмута, уменьшающего интенсивность γ -излучения. Замедлитель из полиэтилена из-за большего содержания атомных ядер кислорода и углерода немного лучше должен уменьшать регистрируемую интенсивность тормозного излучения по сравнению с оргстеклом, но, поскольку эти атомные ядра легкие, это уменьшение будет небольшим, поэтому будем считать величину интенсивности тормозного излучения при использовании замедлителя из полиэтилена такой же, как и при использовании замедлителя из оргстекла.

Сравним результаты измерений, когда датчик оставался в неподвижном состоянии, а замедлители заменялись. Сначала заменялся замедлитель из оргстекла и замедлитель из полиэтилена с объемным вкраплением висмута, измерения проводились трижды, каждый раз при энергиях 2.1 и 1.85 МэВ. Затем водный фантом придвигался к литиевой мишени на 20 мм и также трижды проводились измерения с замедлителем из полиэтилена. Результаты измерения приведены в табл. 1, 2. Здесь мы определяли мощность борной дозы и дозы γ -излучения, отнимая от измеренной скорости счета соответствующего детектора определенное выше значение сдвигки нулевого сигнала.

Таблица 1. Скорость счета нейтронного датчика Y , нормированная на ток пучка протонов, и определенная мощность борной дозы D_B

Замедлитель	Y , 1/(с·мА)	D_B , отн. ед.	D_B , %
Оргстекло	$14\,280 \pm 400$	$14\,400 \pm 400$	100
Полиэтилен с объемным вкраплением висмута	$13\,740 \pm 300$	$13\,870 \pm 300$	96 ± 4
Полиэтилен	$22\,500 \pm 1000$	$22\,630 \pm 1000$	157 ± 7

Таблица 2. Скорость счета датчика γ -излучения Y , нормированная на ток пучка протонов, и определенная мощность дозы γ -излучения D_γ

Замедлитель	Y , 1/(с·мА)	D_γ , отн. ед.	D_γ , %
Оргстекло	2860 ± 150	2230 ± 160	100
Полиэтилен с объемным вкраплением висмута	2140 ± 120	1720 ± 130	77 ± 9
Полиэтилен	4110 ± 190	3480 ± 200	156 ± 10

Ранее мы использовали замедлитель из оргстекла и провели большое количество исследований с органическими образцами, лабораторными животными, а также проводили облучение домашних животных (кошек и собак) со спонтанными опухолями. Со списком публикаций этих исследований можно ознакомиться в отдельных главах монографий [1–3] и в статье [7]. По этой причине сравним полученные результаты с использованием замедлителя из оргстекла.

Видно, что применение замедлителя из полиэтилена с объемным вкраплением висмута позволило существенно (на 23 %) уменьшить мощность дозы γ -излучения практически без снижения мощности борной дозы. Данный эффект объясняется тем, что размеры и замедляющие свойства замедлителей одинаковы и потому нет разницы в борной дозе, зато наличие тяжелого металла внутри замедлителя уменьшает дозу γ -излучения.

Также видно, что применение полиэтилена меньшей толщины вместо оргстекла привело к одинаковому повышению мощности как борной дозы, так и дозы γ -излучения. Такое повышение объясняется приближением детектора к источнику излучения. Если при использовании замедлителя из оргстекла детектор размещен на расстоянии 108 мм от литиевого слоя мишени, то в случае использования замедлителя из полиэтилена — на расстоянии 88 мм. Полагая, что зависимость интенсивности излучения от расстояния квадратичная, получим, что при-

менение более тонкого замедлителя увеличивает мощность дозы в 1.51 раза, что хорошо согласуется с измеренными значениями.

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что применение замедлителя из полиэтилена с объемным вкраплением висмута улучшает характеристики пучка нейтронов для проведения исследований в области бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении научных исследований в области бор-нейтронозахватной терапии для формирования пучка нейтронов используется водородосодержащий замедлитель, обеспечивающий большую мощность дозы по сравнению с замедлителем из фторида магния, используемым для лечения больных. В работе проведено сравнение трех замедлителей, изготовленных из оргстекла, полиэтилена и полиэтилена с объемным вкраплением висмута. С помощью малогабаритного детектора с парой литиевых полистирольных сцинтилляторов, один из которых обогащен бором, измерены пространственные распределения борной дозы и дозы γ -излучения в водном фантоме. Установлено, что замедлитель из полиэтилена по сравнению с замедлителем из оргстекла за счет меньшей толщины обеспечивает большую мощность как борной дозы, так и дозы γ -излучения. Замедлитель из полиэтилена с объемным вкраплением висмута по срав-

нению с замедлителем из оргстекла существенно снижает мощность дозы γ -излучения при сохранении мощности борной дозы. Рекомендовано использовать замедлитель из полиэтилена с объемным вкраплением висмута для проведения научных исследований в области БНЗТ с применением органических образцов, лабораторных животных, а также при облучении домашних животных со спонтанными опухолями для разработки средств дозиметрии и тестирования новых препаратов адресной доставки бора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках госзадания “Конъюгаты бор-содержащих квантовых точек с биовекторами для диагностики и бор-нейтронозахватной терапии поверхностных злокачественных опухолей (FEEM-2024-0011)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. Ed. by W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa, K. Ono. Springer, 2025.
2. *Ahmed M., Alberti D., Altieri S. et al.* Advances in Boron Neutron Capture Therapy. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2023.
3. *Taskaev С.Ю.* Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: Физматлит, 2024.
4. Poly-Biz specifications.
https://www.shieldwerx.com/_files/ugd/fb24e8_6a2cdd78994041abb62cd67538a7e3d2.pdf
5. *Bykov T., Kasatov D., Koshkarev A. et al.* J. Instrum. 2021. V. 16. Art. P10016.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10016>
6. *Taskaev S., Bykov T., Kasatov D. et al.* Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. 2021. V. 502. P. 85.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.010>
7. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M. et al.* Biology. 2021. V. 10. Art. 350.
<https://doi.org/10.3390/biology10050350>