

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 539.1.07

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ С ПОМОЩЬЮ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА

И. Ф. Химматов¹, С. Е. Улин²

Обсуждается возможность применения ксенонового гамма-спектрометра (КГС) на основе цилиндрической ионизационной камеры, заполненной ксеноном при давлении 40 атм., для определения дозовой нагрузки при проведении нейтрон-захватной терапии (НЗТ). Достоинством детектора является устойчивость к потокам нейтронов и высокое энергетическое разрешение (1.7% при энергии гамма-квантов 662 кэВ). Эти характеристики обеспечивают возможность получения надежных и эффективных результатов при проведении НЗТ. В данной работе использовались Рн-Ве источник нейтронов и импульсный генератор нейтронов.

Ключевые слова: нейтрон-захватная терапия, ксенон, радиационная стойкость, источник нейтронов Рн-Ве, импульсный генератор нейтронов, ксеноновый гамма-спектрометр, гамма-кванты.

1. Введение. Нейтронная захватная терапия является одним из наиболее эффективных методов борьбы с онкологическими заболеваниями. Данная методика успешно развивается и в перспективе может стать стандартным подходом при проведении лучевой терапии. Особенно это важно в ситуациях, когда традиционные методы демонстрируют низкую результативность или их применение ограничено. Преимущества НЗТ наиболее ярко проявляются при лечении опухолей со сложной локализацией. Однако несмотря на то, что этот метод был предложен Лочером еще в 1936 году и продолжает развиваться

¹ Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова, 140104 Узбекистан, Самарканд; e-mail: islombekhimmatov24@gmail.com.

² НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: seulin@gmail.com.

ся, в настоящее время, его широкое применение ограничено несколькими причинами. Одной из основных проблем является сложность определения дозы, которую получает пациент в процессе терапии. Несмотря на использование самых современных приборов для измерения поглощенной дозы, их стабильность существенно зависит от интенсивности используемых потоков нейтронов. При проведении НЗТ, как правило, применяются тепловые нейтроны, которые, попадая в рабочее вещество гамма-спектрометров, ухудшают их рабочие характеристики. Несмотря на широкое распространение сцинтилляционных и полупроводниковых гамма-спектрометров, они обладают невысокой радиационной стойкостью к нейтронным потокам [1].

Использование гамма-спектрометров во время проведения НЗТ обеспечивает возможность определить дозовую нагрузку на пациента путем регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ.

В радиационной лаборатории НИЯУ «МИФИ» разработаны КГС на основе цилиндрической импульсной ионизационной камеры с экранирующей сеткой. Энергетическое разрешение КГС составляет $1.7 \pm 0.3\%$ при энергии γ -квантов 662 кэВ. КГС обладает хорошей радиационной стойкостью, а также высокой стабильностью при долговременной работе [2].

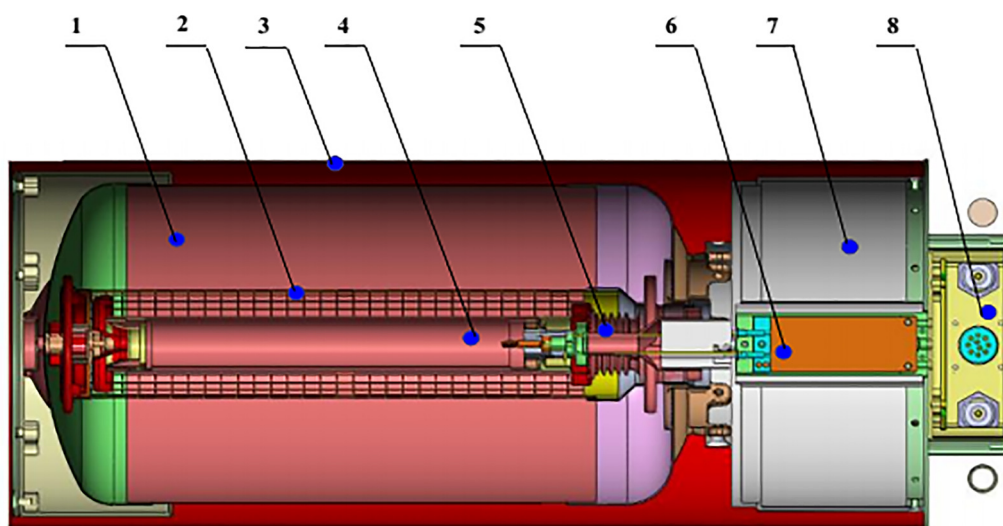


Рис. 1: Принципиальная схема ксенонового гамма-спектрометра: 1 – цилиндрическая импульсная ионизационная камера; 2 – экранирующая цилиндрическая сетка; 3 – герметичный корпус; 4 – анод; 5 – керамический гермоввод; 6, 8 – зарядочувствительный усилитель; 7 – высоковольтный источник питания.

2. Экспериментальное оборудование.

2.1. Ксеноновый гамма-спектрометр. Эксперименты по регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ проводились с помощью КГС с чувствительным объемом 2000 см³. В качестве рабочего вещества в γ -спектрометре использовался сжатый ксенон ${}^4\text{Xe}$ при давлении ~ 40 атм с небольшой добавкой водорода H_2 для увеличения скорости дрейфа электронов. При наполнении гамма-спектрометра использовался предварительно очищенный ксенон с содержанием электроотрицательных примесей $< 10^{-10}$ молярных долей. Схема КГС, используемого в данной работе, приведена на рис. 1. Характеристики КГС приведены в табл. 1 [2].

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики КГС

Плотность рабочего вещества (ксенона), г/см ³	0.3
Диапазон измеряемых энергий гамма-квантов, МэВ	0.05–5
Энергетическое разрешение для энергии гамма-квантов 662 кэВ, %	1.7 ± 0.3
Эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ, %	3.21
Рабочий объем, см ³	2000
Масса, кг	5
Габариты, см	Ø15×45
Энергопотребление, Вт	20
Напряжение питания, В	24

2.2. Схема эксперимента. Оборудование и геометрия эксперимента по регистрации гамма-квантов, возникающих в процессе проведения НЗТ, схематически представлены на рис. 2. В практике НЗТ обычно применяется коллимированный поток тепловых нейтронов. Нейтроны, которые упруго отражаются от мишени, могут воздействовать на гамма-спектрометр, используемый для определения дозы, что, в свою очередь, может изменять его характеристики. В данной работе для оценки нейтронной стойкости КГС использовался изотропный источник нейтронов (нейтронный генератор ИНГ-007 и нейтронный источник Pu-Be), свойства которого остаются неизменными при прямом воздействии нейтронным излучением. Мишень с объёмом 120 см³, помещенная в тонкую полиэтиленовую упаковку, представляет собой водный раствор борной кислоты. Мишень облучается тепловыми нейтронами. Образующиеся при этом гамма-кванты с энергией 478 кэВ регистрируются с помощью КГС.

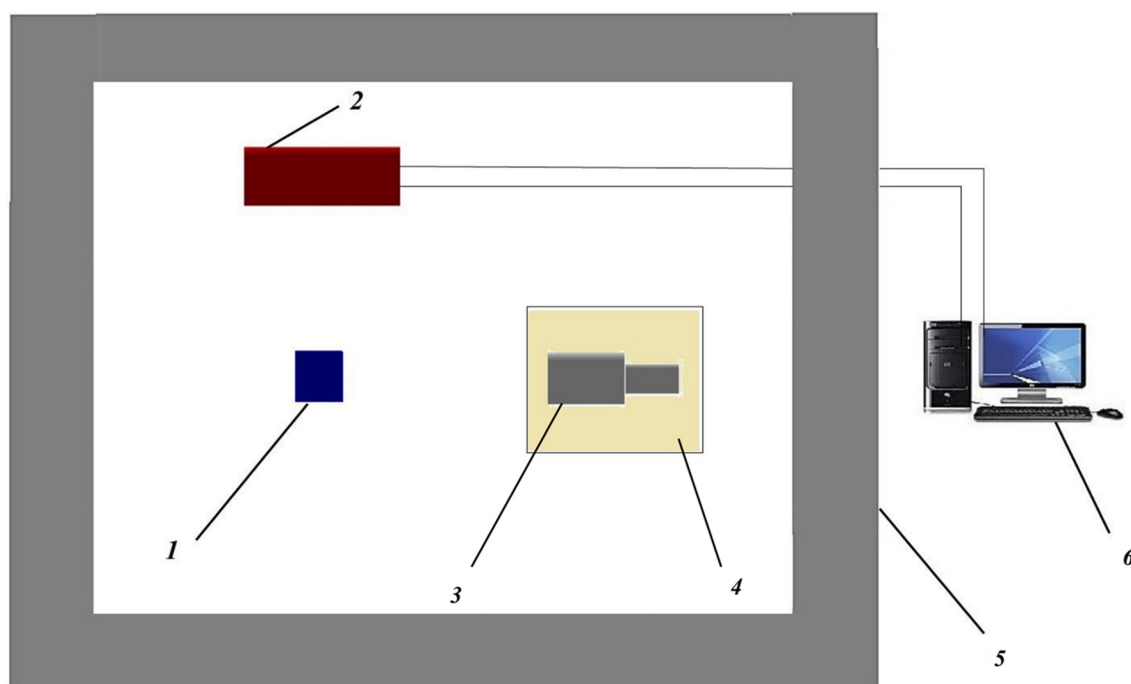
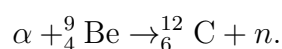


Рис. 2: Оборудование и схема эксперимента по облучению мишени нейтронным источником: 1 – мишень, 2 – КГС, 3 – источник нейтронов Pu-Be, 4 – парафин, 5 – помещения для измерений, 6 – компьютер.

2.3. Использование нейтронного источника Pu-Be. Pu-Be нейтронный источник имеет следующие характеристики: период полураспада $T_{1/2} = 24000$ лет, диапазон энергий нейтронов 0–14 МэВ, активность источника $4.6 \cdot 10^6$ Бк. Преимуществом этого источника является незначительный фон сопутствующего γ -излучения. Нейтроны образуются в результате бомбардировки бериллия альфа-частицами, испускаемыми плутонием, в реакции:



Pu-Be-источник, представляющий собой мелкозернистый порошок металлического бериллия, смешанный с солями плутония и упакованный в металлическую ампулу. Ампула покрыта парафином для генерации тепловых нейтронов.

Спектры, полученные с помощью гамма-спектрометра при облучении мишени тепловыми нейтронами источника Pu-Be, показаны на рис. 3.

При облучении мишени в спектре четко виден пик с энергией 478 кэВ. Поскольку источник изотропен, в рабочее вещество гамма-спектрометра попадают и нейтроны. В спектрах наблюдается γ -линия с энергией 668 кэВ. Эта линия возникает в результате

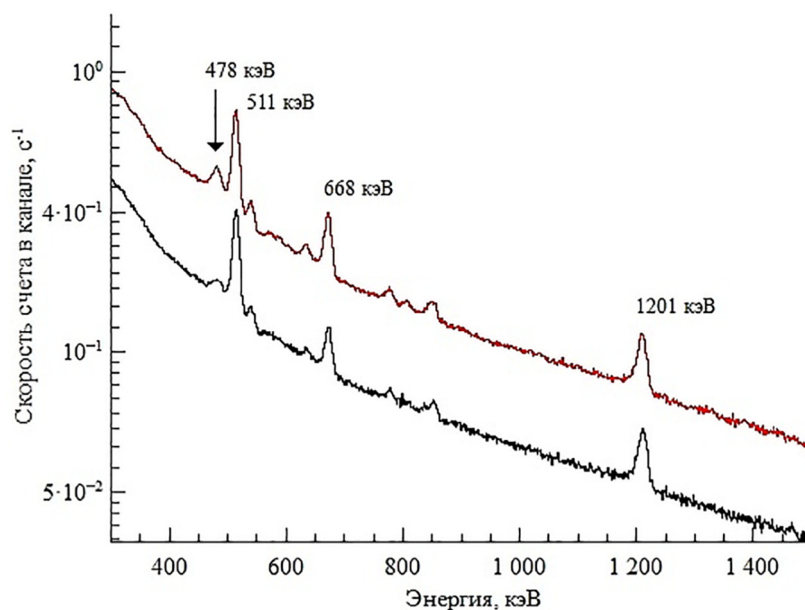
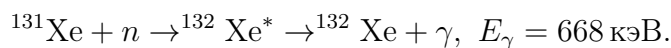
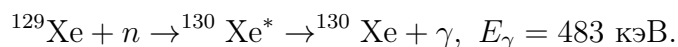


Рис. 3: Гамма-спектры, измеренные КГС (время экспозиции 60000 с): нижний спектр – естественного радиационного фона без мишени, верхний спектр – при наличии мишени.

взаимодействия тепловых нейтронов с рабочим веществом детектора, в частности, с изотопом ксенона ^{131}Xe



Изотоп ксенона ^{129}Xe присутствует в рабочем веществе гамма-спектрометра. При взаимодействии с тепловыми нейтронами этот изотоп испускает гамма-квант с энергией 483 кэВ



Пик с такой энергией наблюдается в фоновом (без мишени) спектре. Появление пика с энергией 511 кэВ связано с аннигиляционными γ -квантами, которые возникают при взаимодействии γ -излучения с энергией более 1022 кэВ с конструктивными элементами ксенонового детектора и окружающими его материалами [3].

В результате анализа спектров определена поглощенная доза на мишени. На рис. 5 показана зависимость поглощенной дозы от концентрации борной кислоты.

2.4. Импульсный нейтронный генератор. Импульсный нейтронный генератор ИНГ-07 представляет собой устройство, работающее на основе термоядерных реакций. Он

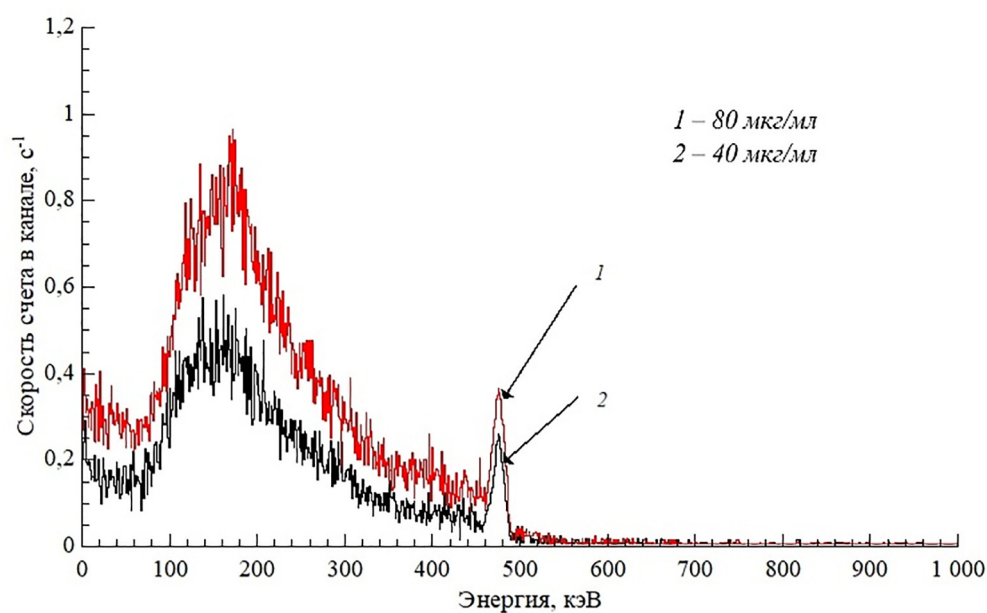


Рис. 4: Гамма-спектры, измеренные с помощью КГС, при облучении мишени, водного раствора борной кислоты с различной концентрацией ^{10}B .

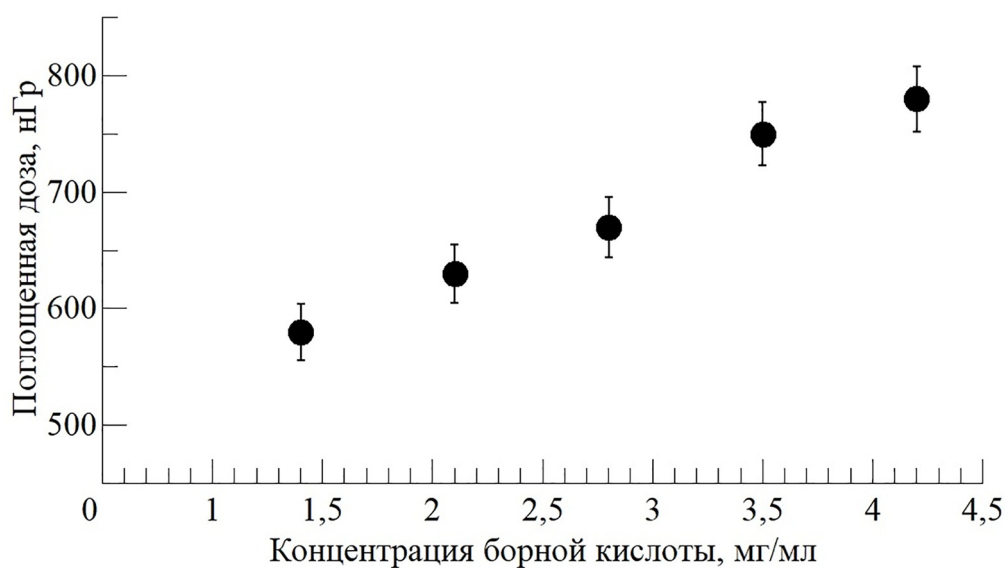


Рис. 5: Зависимость поглощенной дозы в мишени от концентрации борной кислоты.

играет важную роль в исследованиях, в которых используются интенсивные кратковременные нейтронные импульсы. ИНГ-07 генерирует импульсы с интенсивностью $10^7 - 10^9$ нейтронов за импульс и частота нейтронного генератора составляет 10 кГц. Энергетически диапазон испускаемых нейтронов простирается от 2.5 до 14 МэВ, что делает

его подходящим для различных экспериментальных задач. Основной принцип работы ИНГ-07 заключается в ускорении заряженных частиц и последующей бомбардировке ими мишени для инициирования ядерных реакций. Процесс начинается с ускорения ионов дейтерия (D) и/или трития (T) с помощью электрического поля до высоких энергий. Эти ускоренные ионы затем направляются на мишень, содержащую дейтерий или тритий. В результате столкновения ионов с мишенью происходят ядерные реакции. Эти реакции приводят к испусканию нейтронов с высокой энергией, которые затем используются в различных научных и прикладных исследованиях [4].

Генератор нейтронов создает изотропный поток быстрых нейтронов. Для получения потока тепловых нейтронов применялись канистры с водой, окружающие нейтронный генератор.

В качестве мишени в каждом измерении использовался водный раствор борной кислоты разной концентрации.

На рис. 4 приведены гамма-спектры, полученные при облучении мишени растворами двух различных концентраций ^{10}B . Время экспозиции составляло 900 с.

Как выше упоминалось, источник нейтронов является изотропным, что приводит к попаданию нейтронов в активную область ксенонового гамма-спектрометра. В результате, спектрометр также фиксирует нейтроны. Его эффективность при регистрации тепловых нейтронов в гамма-линии 668 кэВ равна $0.199 \pm 0.005\%$ [5, 6]. В ходе облучения мишени импульсным нейтронным генератором, количество тепловых нейтронов, попадающих в рабочую область спектрометра, составляет 487 ± 12.6 нейтронов в секунду. Несмотря на прямое, помимо мишени, попадание нейтронов на гамма-спектрометр, у КГС не было зафиксировано изменений в положении гамма-линии или ухудшения энергетического разрешения.

3. Заключение. Из полученных результатов следует, что ксеноновый гамма-спектрометр имеет высокую радиационную стойкость по отношению к тепловым нейтронам. Применение изотропных нейтронных источников не повлияло на работоспособность гамма-спектрометра: аппаратура надёжно зарегистрировала гамма-излучение с энергиями 478 кэВ. При этом были сохранены основные эксплуатационные характеристики КГС. С его помощью можно одновременно регистрировать гамма-кванты и интенсивность нейтронных потоков. Использование ксенонового гамма-спектрометра при проведении НЗТ обеспечивает эффективное и надежное определение дозы, получаемой пациентом, которому вводится определенная концентрация борсодержащего фармпрепарата.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. Бикчурина, Т. Быков, И. Ибрагим и др., *Front. Nucl. Eng.* **2**(Октябрь), 1 (2023). <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1266562>.
- [2] С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **47**(6), 32 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620060081>.
- [3] В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев и др., *Приборы и техника эксперимента* **55**(4), 3 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0020441212030104>.
- [4] С. Н. Корякин, Н. А. Кайдан, Е. В. Исаева и др., *Радиация и риск* **27**(1), 94 (2018). <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2018-27-1-94-106>.
- [5] А. Е. Шустов, И. В. Чернышева, В. В. Дмитренко и др., *Ж. Физ. Конф. Сер.* **675**(4), (2016). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/675/4/042024>.
- [6] И. Ф. Химматов, С. Е. Улин, *Ядерная физика* **87**(05), 59 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063778824700601>.

Поступила в редакцию 28 октября 2024 г.

После доработки 2 марта 2025 г.

Принята к публикации 7 марта 2025 г.