

**XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова:
Концентрированные потоки энергии в космической технике,
электронике, экологии и медицине.
Секция «Радиационные технологии. Синхротронные, нейтронные и ядерно-физические
методы диагностики и модификации материалов»**

Применение ксенонового гамма-спектрометра для нейтрон-захватной терапии

И. Ф. Химматов,* С. Е. Улин†

¹Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова
Узбекистан 140104, Самарканд

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Россия 115409, Москва

(Поступила в редакцию 15.04.2025; подписана в печать 22.04.2025)

Одной из ключевых задач нейтрон-захватной терапии (НЗТ) остаётся минимизация влияния на здоровые ткани и точный контроль распределения дозовой нагрузки, что делает актуальным исследование новых детекторов, устойчивых к потоку тепловых нейтронов. Использование гамма-спектрометров в процессе НЗТ позволяет определить дозовую нагрузку на пациента за счет регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ от продуктов ядерной реакции. Хотя сцинтилляционные и полупроводниковые спектрометры широко применяются для НЗТ, но они имеют низкую радиационную стойкость к нейтронным потокам. В данной работе обсуждается возможность использования ксенонового гамма-спектрометра (КГС), основанного на цилиндрической ионизационной камере, заполненной ксеноном под давлением 40 атм., для оценки дозовой нагрузки при проведении НЗТ. В рамках данной работы было выполнено моделирование процесса нейтрон-захватной терапии с использованием программной среды GEANT4, а также проведен эксперимент, в котором тепловые нейтроны генерировались при помощи нейтронного генератора.

PACS: 29.25.Dz, 29.40.Cs УДК: 539.1.07

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

ВВЕДЕНИЕ

Нейтрон-захватная терапия (НЗТ) — метод лечения онкологических заболеваний, основанный на взаимодействии нейтронов с веществами, обладающими высоким сечением захвата, такими как бор-10 (^{10}B). Основной принцип метода заключается в том, что эти вещества, накапливающиеся преимущественно в опухолевых клетках, захватывают тепловые нейтроны, что приводит к выделению разрушительных для клеток продуктов реакции, таких как альфа-частицы и литиевые ядра. Идея НЗТ зародилась еще в 1930-х годах, вскоре после открытия нейтронов. Первый экспериментальный курс лечения был проведен в 1950-х годах в США. На ранних этапах метод основывался на использовании ядерных реакторов в качестве источников нейтронов, что ограничивало его применение [1].

С развитием технологий, особенно в области генерации нейтронов и разработки специальных борсодержащих соединений, НЗТ вновь привлекла внимание исследователей в конце XX века. Современные установки

для НЗТ используют как реакторы, так и компактные нейтронные генераторы, что повышает доступность метода.

Для успешного внедрения НЗТ в клиническую практику ключевой задачей остаётся обеспечение точного контроля распределения дозовой нагрузки. Это требует разработки специализированных детекторных систем, устойчивых к воздействию потока тепловых нейтронов и способных функционировать в условиях интенсивного излучения [2, 3]. Особую важность приобретает совершенствование методов дозиметрии, поскольку от точности определения дозовой нагрузки зависит безопасность пациента, эффективность уничтожения опухолевых клеток и общая результативность терапии. Современные подходы к созданию радиационно-стойких детекторов и алгоритмов моделирования дозовых полей становятся основой для персонализации лечения и повышения его прогнозируемости, что критически важно для клинического применения НЗТ. Дозиметрические ошибки могут привести к недостаточной дозе в опухоли или к повреждению здоровых тканей [4, 5].

В настоящей работе предлагается КГС для измерение дозовой нагрузки в процессе НЗТ. Основными преимуществами данного гамма-спектрометра являются его высокая радиационная стойкость к нейтронным

* islombekhimmatov24@gmail.com

† seulin@gmail.com

потоком и его энергетическое разрешение составляет $(1.7 \pm 0.3)\%$ при энергии гамма-квантов 662 кэВ [6]. Эти характеристики делают КГС надежным инструментом для получения эффективных данных для проведения НЗТ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1.1. Ксеноновый гамма-спектрометр

Ксеноновый гамма-спектрометр представляет собой уникальный прибор для регистрации и анализа гамма-излучения, который обладает широкими возможностями применения в научных исследованиях, медицине, ядерной физике и прикладных задачах радиационного мониторинга. Энергетическое разрешение прибора составляет $1.7 \pm 0.3\%$ на энергии 662 кэВ (γ -излучение ^{137}Cs). Широкий диапазон регистрируемых энергий от 0.05 до 3 МэВ позволяет использовать КГС для анализа разнообразных физических процессов и источников излучения. Ксеноновый гамма-спектрометр представляет собой импульсную ионизационную камеру цилиндрической формы с экранирующей сеткой. Она заполнена сжатым ксеноном (^{54}Xe) под давлением около 40 атм, с добавлением небольшого количества водорода (H_2), который улучшает скорость дрейфа электронов [7]. На рис. 1 представлен пример типичного гамма-спектра, зарегистрированного с использованием КГС.

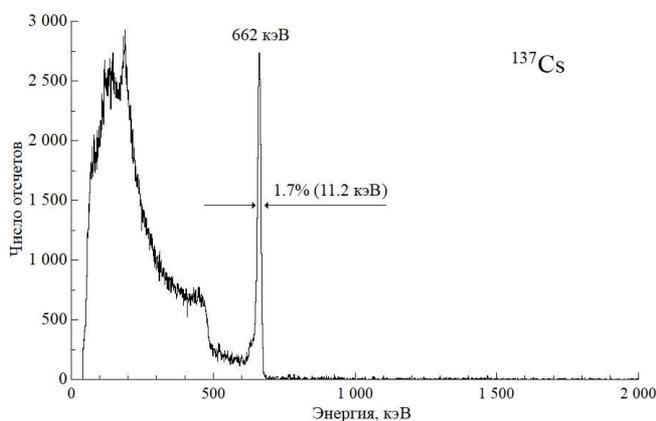


Рис. 1. Спектр ^{137}Cs , полученный с помощью ксенонового гамма-спектрометра

1.2. Импульсный нейтронный генератор

Импульсный нейтронный генератор ИНГ-07 представляет собой устройство, основанное на использовании ядерных реакций, протекающих при взаимодействии ускоренных заряженных частиц с мишенью.

Генератор способен создавать нейтронные импульсы с интенсивностью в диапазоне 107–109 нейтронов за импульс при частоте до 10 кГц, что делает его высокоэффективным инструментом для решения широкого круга задач. Энергия испускаемых нейтронов варьируется от 2.5 до 14 МэВ, что позволяет применять устройство как для фундаментальных исследований, так и для прикладных целей, включая дефектоскопию, нейтронную активацию и радиационные испытания [8].

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

1.3. Схема эксперимента

Схематическое представление оборудования и геометрии эксперимента по регистрации гамма-квантов, возникающих в ходе проведения НЗТ, показано на рис. 2. В качестве источников нейтронов в эксперименте использовались импульсный нейтронный генератор (ИНГ-07).

Объем мишени составляет 120 см^3 . Она представляет собой водный раствор борной кислоты, помещенный в тонкую оболочку из полиэтилена. Мишень подвергается облучению тепловыми нейтронами, что вызывает ядерные реакции, сопровождающиеся эмиссией гамма-квантов:



Гамма-кванты с энергией 478 кэВ регистрируются с помощью КГС.

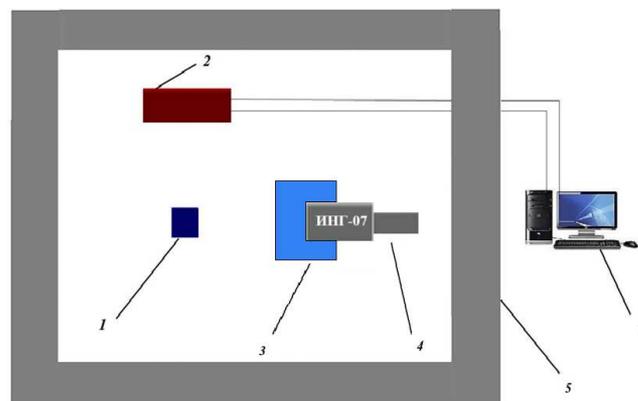


Рис. 2. Оборудование и схема эксперимента по облучению мишени нейтронным источником. 1 — мишень, 2 — КГС, 3 — вода, 4 — нейтронный генератор, 5 — помещения для измерений, 6 — компьютер

Моделирование процесса НЗТ проводилось при помощи программного пакета GEANT4.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мишень подвергалась облучению потоком тепловых нейтронов, и гамма-кванты, возникающие в результате этого, регистрировались с использованием КГС. На рис. 3 показаны спектры, полученные как в ходе эксперимента, так и с помощью моделирования. В обоих случаях был обнаружен пик, соответствующий энергии 478 кэВ.

Источник нейтронов является изотропным, что нейтроны распределяются равномерно во всех направлениях, включая попадание нейтронов в рабочее вещество гамма-спектрометра. В спектрах наблюдается γ -линия с энергией 668 кэВ, которая возникает из-за взаимодействия тепловых нейтронов с рабочим веществом детектора, особенно с изотопом ксенона ^{131}Xe .

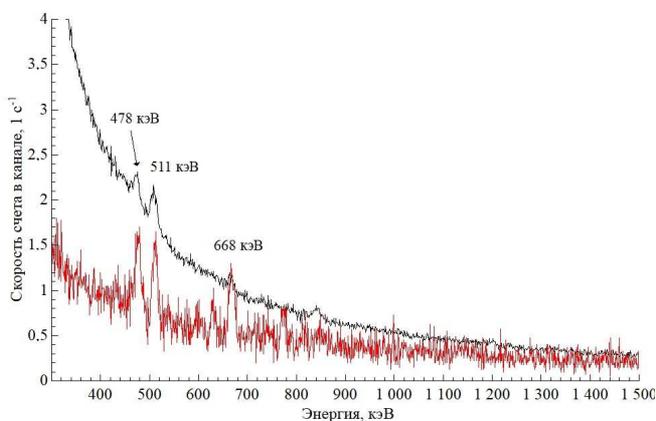
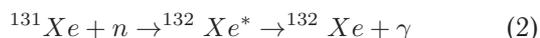


Рис. 3. Сравнение моделируемого и экспериментального спектров

Появление пика с энергией 511 кэВ связано с аннигиляционными γ -квантами, которые образуются при взаимодействии γ -излучения с энергией выше 1022 кэВ с конструктивными элементами ксенонового детектора и окружающими его материалами.

В этом процессе происходит аннигиляция позитрона, вызванная взаимодействием высокоэнергетического γ -кванта с материалами детектора, в результате чего образуются два гамма-кванта с энергией 511 кэВ, которых испускается в противоположных направлениях. В этих экспериментах в качестве мишени использовался водный раствор борной кислоты с различными концентрациями ^{10}B . На рис. 4 показаны гамма-спектры, полученные при облучении мишени растворами борной кислоты с двумя разными концентрациями (40 мкг/мл, 80 мкг/мл). Фон вычтен из измеренных спектров. Время экспозиции составило 900 с.

Как уже упоминалось, источник нейтронов является изотропным, что способствует попаданию нейтронов в активную область ксенонового гамма-спектрометра.

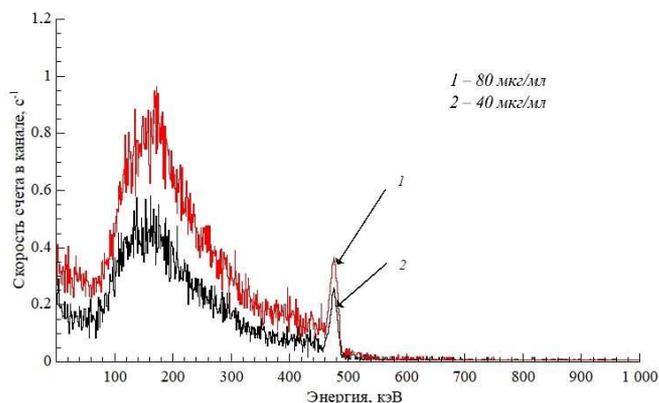


Рис. 4. Гамма-спектры, измеренные с помощью КГС, при облучении мишени с водного раствора борной кислоты с различной концентрацией ^{10}B

В результате спектрометр также регистрирует нейтроны. Эффективность детектора при регистрации тепловых нейтронов в гамма-линии 668 кэВ составляет $0.199 \pm 0.005\%$ [9, 10]. Во время облучения мишени импульсным нейтронным генератором количество нейтронов, попадающих в рабочую область спектрометра, равно 487 ± 12.6 нейтронов в секунду. Несмотря на прямое попадание нейтронов в спектрометр, не было зафиксировано изменений в положении гамма-линии или ухудшения энергетического разрешения. Это свидетельствует о том, что ксеноновый детектор сохраняет свою работоспособность и стабильность при воздействии нейтронного потока.

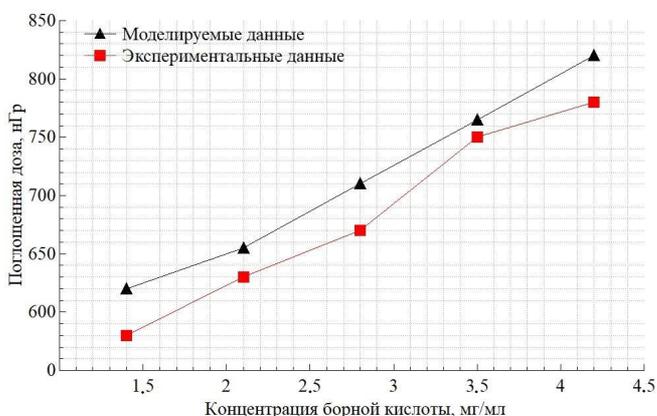


Рис. 5. Зависимость поглощенной дозы в мишени от концентрации борной кислоты

На рис. 5 представлена зависимость поглощенной дозы, полученной пациентом, от концентрации борной кислоты в процессе терапии, определенной моделью и реальным КГС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о устойчивости КГС к интенсивному нейтронному облучению. Спектрометр демонстрирует способность одновремен-

но детектировать гамма-излучение и проводить оценку плотности нейтронного потока. Его применение в НЗТ обеспечивает точность и достоверность дозиметрических измерений при введении пациенту борсодержащих препаратов.

-
- [1] *Липенгольц А.А., Григорьева Е.Ю., Иванов С.М., Кулаков В.Н., Шейно И.Н.* // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. **1**. 15 (2018).
- [2] *Bikchurina M., Vykov T., Ibrahim I.* et. al. // Front. Nucl. Eng. **2**. 1 (2023).
- [3] *Wang S., Zhang Z., Miao L., Li Y.* // Frontiers in Oncology. **12**. 1 (2022).
- [4] *Barth R.* // Applied Radiation and Isotopes. **67**. S3 (2009).
- [5] *Khimmatov I.F., Ulin S.E.* // Phys. Atom. Nuclei. **87**. 620 (2024).
- [6] *Novikov A.S., Ulin S.E., Dmitrenko V.V.* et al. // Proc. SPIE. **87**. 111140H (2019).
- [7] *Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Vlasik K.F.* et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. **47**. 176 (2020).
- [8] *Koryakin S., Kaidan N.A., Isaeva E.V., Ulyanenko S.E.* // Radiat. Risk. **27**. 94 (2018).
- [9] *Dmitrenko V.V., Vlasik K.F., Grachev V.M.* et al. // Instrum. Exp. Tech. **55**. 419 (2012).
- [10] *Shustov A.E., Chernysheva I.V., Dmitrenko V.V.*, et al. // J. Phys. Conf. Ser. **675**. 1 (2016).

The application of a xenon gamma spectrometer for neutron capture therapy

I. F. Khimmatov^{1,a}, S. E. Ulin^{2,b}

¹*Samarkand State University named after Sharof Rashidov
Samarkand 140104, Uzbekistan*

²*National Research Nuclear University MEPhI
Moscow, 115409, Russia*

E-mail: ^aislombekhimmatov24@gmail.com, ^bseulin@gmail.com

One of the key challenges in neutron capture therapy (NCT) remains minimizing the impact on healthy tissues and ensuring precise control of dose distribution, making the study of new detectors resistant to thermal neutron flux highly relevant. The use of gamma spectrometers in NCT allows for the assessment of patient dose exposure by detecting 478 keV gamma rays emitted from nuclear reaction products. While scintillation and semiconductor spectrometers are widely used in NCT, they exhibit low radiation resistance to neutron fluxes. This paper explores the feasibility of using a xenon gamma spectrometer (XGS) based on a cylindrical ionization chamber filled with xenon at 40 atm pressure for dose evaluation in NCT. As part of this study, the neutron capture therapy process was simulated using the GEANT4, and an experiment was conducted in which thermal neutrons were generated by a neutron generator.

PACS: 29.25.Dz, 29.40.Cs

Keywords: neutron capture therapy, xenon, radiation resistance, pulsed neutron generator, xenon gamma spectrometer, gamma rays.

Received 15 April 2025.

Сведения об авторах

1. Химматов Исломбек Фазлиддин угли — докторант Самаркандского государственного университета; тел.: (977) 962-88-72, e-mail: islombekhimmatov24@gmail.com.
2. Улин Сергей Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор НИЯУ МИФИ; тел.: (985) 799-76-30, e-mail: seulin@gmail.com.