

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ В БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

© 2024 г. И. Ф. Химматов^{1),*}, С. Е. Улин^{2),**}

Поступила в редакцию 03.04. 2024 г.; после доработки 03.05.2024 г.; принята к публикации 08.05.2024 г.

Одной из основных проблем, связанных с внедрением нейтронозахватной терапии в клиническую практику, является определение поглощенной дозы. Единственным методом, который напрямую позволяет измерить поглощенную дозу, является гамма-спектрометрия, основанная на регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ. В настоящей статье рассматривается возможность применения ксенонового гамма-спектрометра, обладающего высокой радиационной стойкостью к потокам нейтронов. Для рассмотрения процесса нейтронозахватной терапии и проведения соответствующих расчетов использовался программный пакет GEANT4.

DOI: 10.31857/S0044002724050079, EDN: JFNBHK

1. ВВЕДЕНИЕ

Нейтронозахватная терапия (НЗТ) является эффективным методом борьбы с онкологическими образованиями. Эта инновационная методика, основанная на использовании тепловых нейтронов для воздействия на раковые клетки, открывает новые перспективы в лечении онкологических заболеваний. Сегодня применение гамма-спектрометрических методов для нейтронозахватной терапии является достаточно сложной терапевтической задачей. Причин несколько. Во-первых, вся аппаратура для регистрации гамма-квантов должна находиться во время терапевтического сеанса вблизи пациента. Во-вторых, система формирования пучка нейтронов, состоящая из замедлителя и коллиматора, существенно затрудняет размещение гамма-спектрометрической аппаратуры для оптимизации проводимых измерений. В-третьих, детекторы будут регистрировать не только полезные сигналы от распада ядер бора, но и рассеянные нейтроны, а также фоновые гамма-кванты. Для измерения дозы гамма-излучения в НЗТ используют различные типы детекторов, включая счетчики Гейгера–Мюллера, сцинтилляционные детекторы, полупроводниковые детекторы, термолюминесцентные дозиметры и другие.

На ядерном реакторе ИРТ МИФИ проведен ряд работ по нейтронозахватной терапии для определения концентраций ^{10}B и Gd в различных биологических пробах [1]. При этом регистрация гамма-излучения от облучаемых нейтронами ядер осуществлялась с помо-

щью полупроводникового гамма-спектрометра на основе сверхчистого германия (HPGe). К сожалению, радиационная стойкость к нейтронам у этих детекторов не очень высокая [2].

В настоящей статье рассматривается возможность использования ксенонового гамма-спектрометра, который обладает высокой радиационной стойкостью к тепловым нейтронам [3].

Гамма-спектрометры, которые можно использовать для нейтронозахватной терапии, должны обладать следующими характеристиками:

- энергетическое разрешение гамма-детектора должно быть не хуже, чем 3% для энергии гамма-квантов 662 кэВ;

- гамма-детектор должен обладать достаточной эффективностью регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ;

- свойства гамма-детектора не должны ухудшаться при его активации тепловыми нейтронами, и он должен обладать высокой радиационной стойкостью.

Данным требованиям соответствует ксеноновый гамма-спектрометр (КГС), разработанный научными сотрудниками НИЯУ МИФИ.

2. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ксеноновый гамма-спектрометр обладает уникальными возможностями для научных и прикладных исследований в различных областях. Энергетическое разрешение гамма-спектрометра составляет $1.7 \pm 0.2\%$ для энергии γ -квантов 662 кэВ (линия ^{137}Cs) (рис. 1). КГС может эффективно измерять γ -кванты в диапазоне энергий от 0.05 до 3 МэВ. Ксеноновый гамма-спектрометр представляет собой цилиндрическую импульсную ионизационную камеру с экранирующей сеткой, заполненную сжатым ксеноном ^{54}Xe до ~ 40 атм с небольшой добавкой

¹⁾ Самаркандский государственный университет им. Ш. Рашидова, Узбекистан.

²⁾ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия.

* E-mail: islombekhimmatov24@gmail.com

** E-mail: seulin@gmail.com

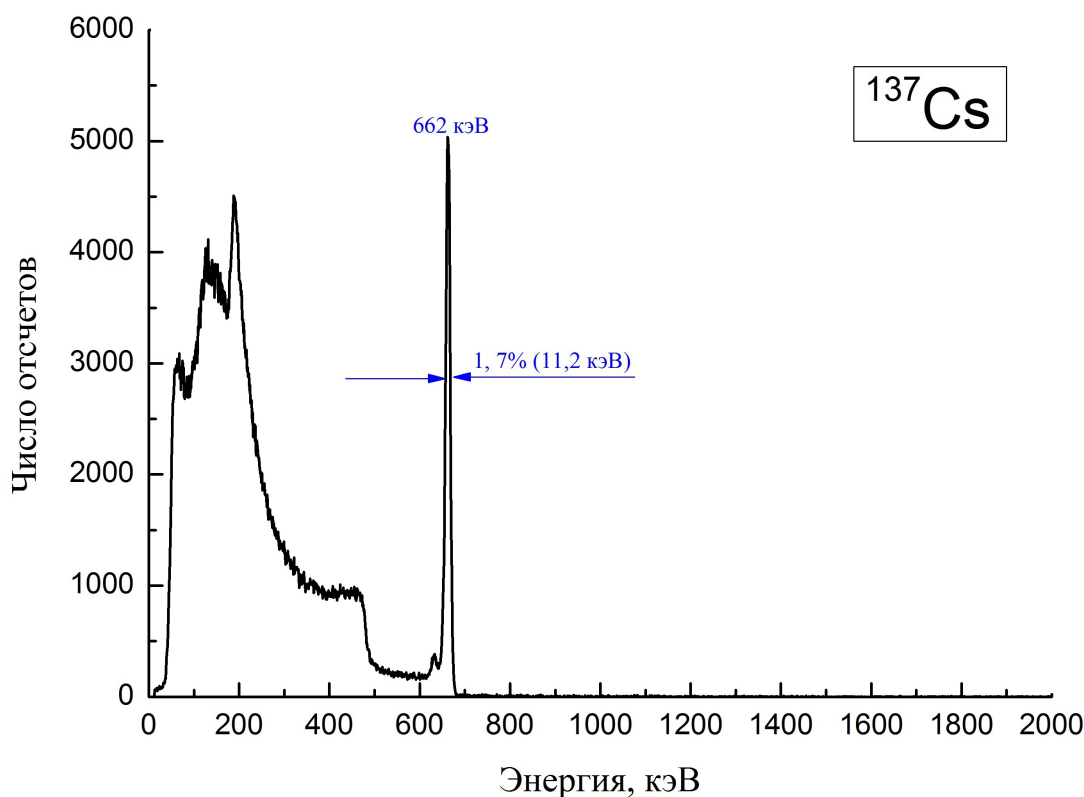


Рис. 1. Спектр ^{137}Cs , полученный с помощью ксенонового гамма-спектрометра (КГС) [3].

водорода H_2 для увеличения скорости дрейфа электронов [3]. Типичный гамма-спектр, измеренный с помощью КГС, показан на рис. 1.

В лабораторных условиях исследовалось влияние потоков нейтронов на спектрометрические свойства КГС [4]. Для сравнения в экспериментах использовался также сцинтилляционный детектор, состоящий из кристалла NaI(Tl) . Эти гамма-спектрометры облучались нейтронами Pu-Be -источника с активностью 4.2×10^5 нейтрон/с. У КГС изменение положения гамма-линии и ухудшение энергетического разрешения не наблюдалось. Общая активация NaI(Tl) детектора оказалась существенно выше, чем КГС [4].

Моделирование процесса НЗТ проводилось при помощи программного пакета GEANT4. При расчетах использовался ксеноновый гамма-спектрометр, мишень и коллимированный поток тепловых нейтронов (рис. 2). Мишень с объемом 125 см^3 помещена в тонкую полиэтиленовую упаковку и представляет собой водный раствор борной кислоты. В каждом конкретном эксперименте использовалась определенная концентрации этого раствора.

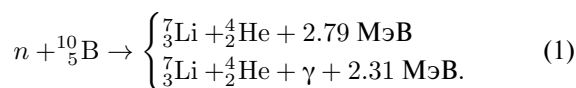
Схема расчетного эксперимента показана на рис. 2. Характеристики КГС указаны в табл. 1.

Поток тепловых нейтронов падал на мишень (смесь воды и борной кислоты различной концентрации).

Таблица 1. Параметры модели ксенонового гамма-спектрометра

Энергетическое разрешение (на линии 478 кэВ), %	2.0 ± 0.1
Плотность ксенона, г/см^3	0.3
Чувствительный объем, см^3	2000
Диаметр КГС, см	12

Взаимодействие тепловых нейтронов с ^{10}B осуществляется по следующей ядерной реакции:



В 6% случаев суммарная энергия ядра ${}^7\text{Li}$ и α -частицы составляет 2.79 МэВ. В 94% случаях возбужденное ядро лития испускает гамма-квант с энергией 0.478 МэВ. Тогда суммарная энергия ядра ${}^7\text{Li}$ и α -частицы будет равна 2.31 МэВ.

Регистрация этих гамма-квантов позволяет определить число взаимодействий нейтронов с ядрами ^{10}B . Ядра ${}^7\text{Li}$ и α -частицы, обладая средней энергией 2.34 МэВ, взаимодействуют с клетками опухоли и уничтожают их.

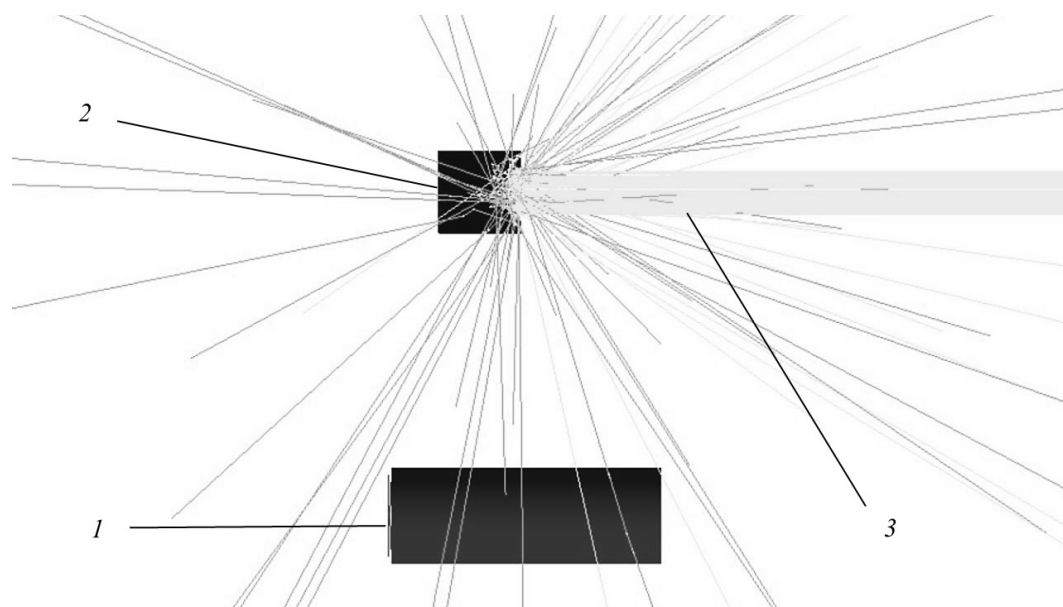


Рис. 2. Расчетная модель: 1 — ксеноновый гамма-спектрометр, 2 — мишень, 3 — пучок тепловых нейтронов.

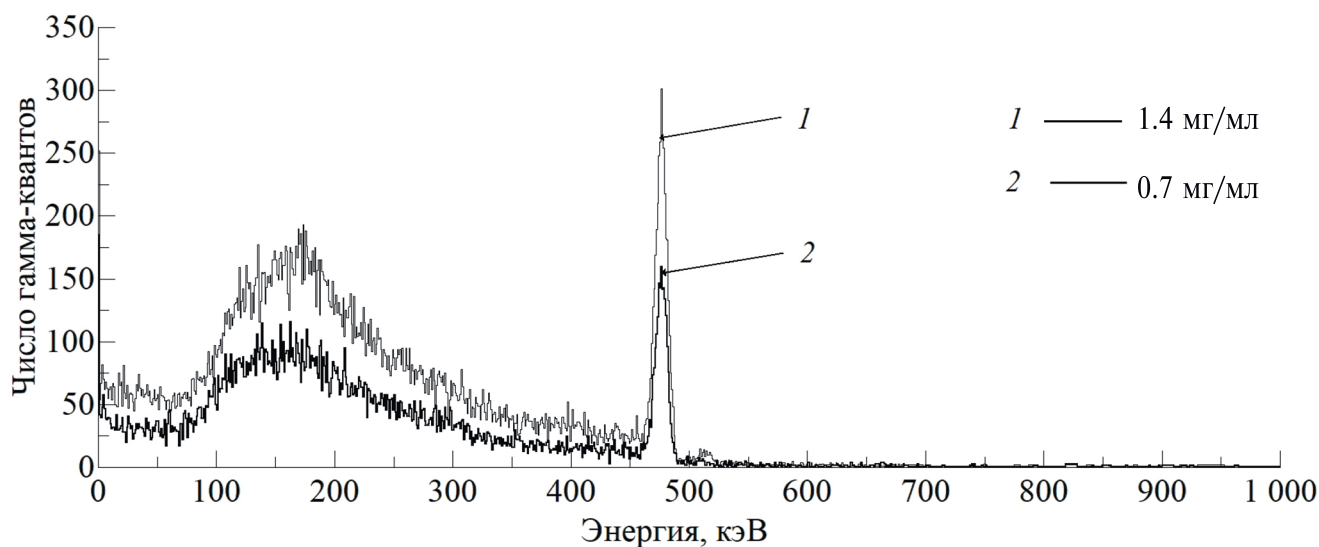


Рис. 3. Рассчитанные гамма-спектры при облучении мишени с различными концентрациями борной кислоты.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гамма-спектры, получаемые при облучении тепловыми нейтронами мишени с концентрациями борной кислоты (0.7 и 1.4 мг/мл), показаны на рис. 3.

Химическая формула борной кислоты выглядит следующим образом: H_3BO_3 . В природе имеется два изотопа бора — ^{10}B (19.8%) и ^{11}B (80.2%). Для ^{10}B сечение взаимодействия с тепловыми нейтронами на несколько порядков больше, чем у ^{11}B [5]. Следовательно, борную кислоту можно использовать для проведения нейтронозахватной терапии.

На рис. 4 показана зависимость числа импульсов (в максимуме пика) для гамма-линии с энергией 478 кэВ от концентрации борной кислоты.

При проведении расчетов методом Монте–Карло была получена оценка величины поглощенной дозы, которую может получить пациент во время НЗТ. Мишень, которая используется в расчетах Монте–Карло, имеет форму куба с размерами $5 \times 5 \times 5 \text{ см}^3$. Радиус нейтронного пучка составляет 2.5 см, а плотность потока тепловых нейтронов 5×10^4 нейтрон/($\text{см}^2 \text{ с}$). На рис. 5 приведена зависимость величины поглощенной дозы в мишени от времени экспозиции.

На основании анализа полученных результатов можно предложить следующую формулу для определения поглощенной дозы:

$$D = \frac{kNE}{m}, \quad (2)$$

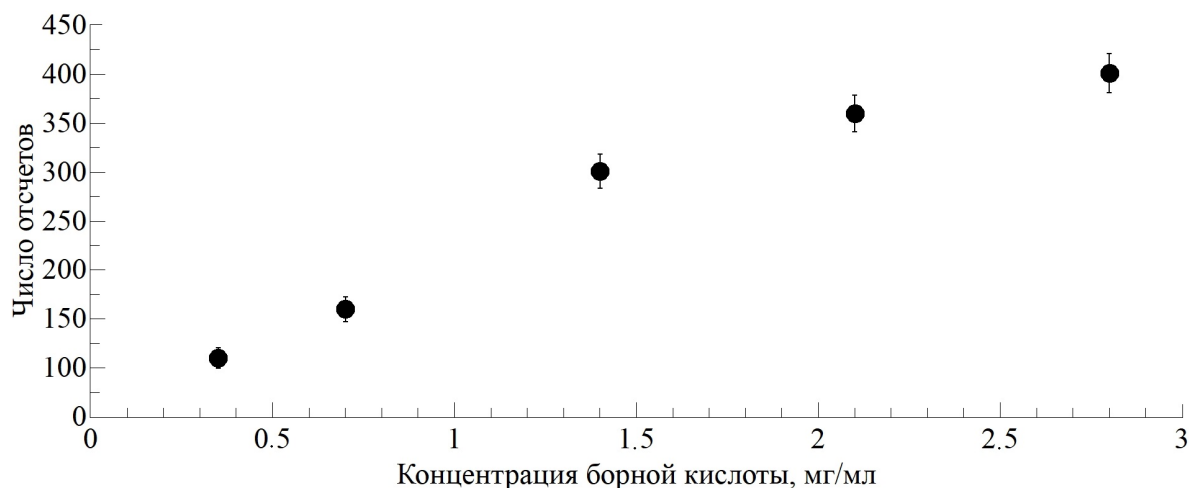


Рис. 4. Зависимость числа импульсов (в максимуме пика) для гамма-линии с энергией 478 кэВ от концентрации борной кислоты.

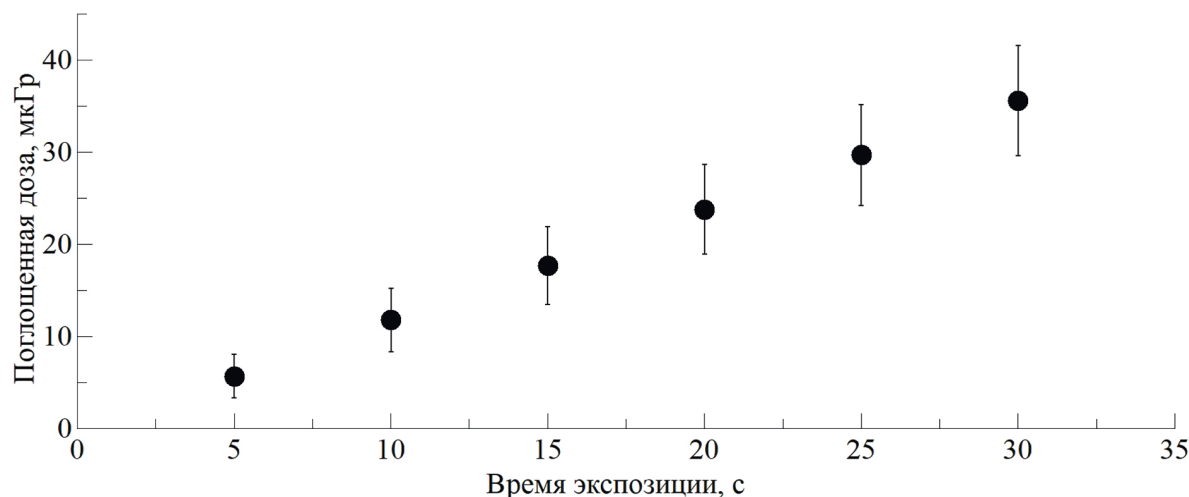


Рис. 5. Зависимость поглощенной дозы в мишени от времени экспозиции.

где $k = 3.6 \times 10^{-7}$ Гр г/МэВ (коэффициент представляет собой поправку на эффективность гамма-спектрометра (КГС) и телесный угол), N — количество импульсов в пике полного поглощения гамма-квантов с энергией 478 кэВ, E — энергия от продуктов реакции (1), m — масса мишени.

При плотности потока тепловых нейтронов 5×10^4 нейтрон/см² с и концентрации борной кислоты 1.4 мг/мл в мишени доза, полученная за счет реакции нейтронного захвата ^{10}B , за время экспозиции 30 с составит 35.6 мкГр.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе (с помощью пакета программ GEANT4) проведен расчетный эксперимент НЗТ с использованием ксенонового гамма-спектрометра.

Получены гамма-спектры, с помощью которых продемонстрирована принципиальная возможность использования данной аппаратуры для терапии онкологических заболеваний. Проведена оценка поглощенной дозы при проведении НЗТ и отмечено, что дозу можно контролировать в процессе облучения тепловыми нейтронами.

Настоящая работа была выполнена при поддержке НИЯУ МИФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. F. Khoknlov, K. N. Zaitsev, V. N. Beliaev, V. N. Kulakov, V. I. Kvasov, A. A. Lipengolts, and A. A. Portnov, in Proceedings of 13th International Congress on Neutron Capture Therapy, Italy, Firenze, November 02–07, 2008 (ENEA, 2008), p. 415.

2. M. Bikchurina, T. Bykov, Ib. Ibrahim, A. Kasatova, D. Kasatov, Iar. Kolesnikov, V. Konovalova, T. Kormushakov, A. Koshkarev, A. Kuznetsov, V. Porosev, S. Savinov, I. Shchudlo, N. Singatulina, E. Sokolova, T. Sycheva, et al., *Front. Nucl. Eng.* **2** (2023).
3. A. S. Novikov, S. E. Ulin, V. V. Dmitrenko, I. V. Chernysheva, V. M. Grachev, K. V. Krivova, A. E. Shustov, Z. M. Uteshev, and K. F. Vlasik, in *Proceedings of the Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XXI*, 11–15 Aug. 2019, San Diego, USA (2019).
4. С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, Р. Р. Егоров, К. В. Кривова, А. И. Маджидов, З. М. Утешев, И. В. Чернышева, А. Е. Шустов, *Краткие сообщения ФИАН*, № 6, 32 (2020).
5. В. Д. Рисованный, А. В. Захаров, У. З. Клочков, Т. М. Гусева, *Бор в ядерной технике*, изд. 2-е, (ГНЦ НИИАР, Димитровград, 2011).
6. GEANT4 TOOLKIT, Geant4-11.1.1-пакет моделирования взаимодействия частиц с веществом; URL <http://geant4.cern.ch>

THE USE OF A XENON GAMMA SPECTROMETER FOR DOSIMETRY IN BORON-NEUTRON CAPTURE THERAPY

I. F. Khimmatov¹⁾, S. E. Ulin²⁾

¹⁾ Samarkand State University named after Sh. Rashidov, Uzbekistan

²⁾ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

One of the main problems associated with the implementation of neutron capture therapy in clinical practice, requiring a solution, is the determination of absorbed dose. The only method that directly allows measuring the absorbed dose is gamma spectrometry, based on the registration of gamma rays with an energy of 478 keV. This article considers the possibility of using a xenon gamma spectrometer, which has high radiation resistance to neutron fluxes. The GEANT4 software package was used to study the neutron capture therapy process and conduct corresponding calculations.