МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 539.1.07

КСЕНОНОВЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР КОЛОДЕЗНОГО ТИПА

Р. Р. Егоров, В. В. Дмитренко, В. М. Грачев, А. И. Маджидов, А. Е. Шустов, Н. М. Свешников, К. Ф. Власик, С. Е. Улин, З. М. Утешев

Современные гамма-спектрометры должны обладать высокими спектрометрическими характеристиками (энергетическое разрешение, эффективность, радиационная стойкость, диапазон рабочих температур, энергопотребление), которые обеспечивают возможность их использования в различных научных исследованиях, в том числе в ядерной медицине. Данная работа посвящена созданию ксенонового гамма-спектрометра колодезного типа (далее – КГС-КТ) для измерения гамма-активности фармацевтических препаратов и определения их изотопного состава. Общая конструкция этого прибора была разработана с помощью параметрической системы автоматизированного проектирования (САПР FreeCAD). Методом Монте-Карло (пакет Geant4) проведены модельные эксперименты для определения основных физических характеристик создаваемой аппаратуры. В качестве гамма-источника использовался смоделированный радиоизотоп Ba-133. Получена зависимость эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии для КГС-КТ, а также от места расположения точечного радиоактивного фармпрепарата внутри колодца. Проведен анализ полученных расчетных результатов и рассмотрена возможность использования данной аппаратуры в области ядерной медицины.

Ключевые слова: гамма-спектрометр, гамма-кванты, ксенон, фармпрепараты.

НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: RREgorov@mephi.ru.

Введение. В современной ядерной медицине для диагностики и терапии онкологических заболеваний широко используются различные радиоактивные изотопы. Перед применением фармпрепаратов необходимо измерить их основные характеристики (активность и изотопный состав) [1, 2]. В настоящее время для этой цели используются сцинтиляционные и полупроводниковые гамма-спектрометры колодезного типа [3, 4]. Первые из них обладают низким энергетическим разрешением, что затрудняет идентификацию изотопного состава исследуемых образцов. Вторые обеспечивают рекордное энергетическое разрешение, но функционируют при криогенных температурах, что ограничивает их применение. К тому же они характеризуются низкой радиационной стойкостью [4].

В данной статье представлен новый гамма-спектрометр колодезного типа. Основой этого прибора является цилиндрическая импульсная ионизационная камера с экранирующей сеткой. В качестве рабочего вещества используется сжатый ксенон (давление 40 атмосфер). В центре ионизационной камеры расположен колодец, в котором могут размещаться исследуемые радиоактивные фармпрепараты. Такая конструкция детектора существенно увеличивает светосилу прибора. Телесный угол, в котором регистрируются гамма-кванты, составляет почти 4π.

Принципиальная схема КГС-КТ. На рис. 1 представлена принципиальная схема ксенонового гамма-спектрометра колодезного типа.

В центре КГС-КТ находится колодец, в котором размещаются фармпрепараты для определения их активности и изотопного состава. Между корпусом (катодом) и анодом располагается экранирующая сетка для устранения индукционного эффекта. На корпус детектора и металлическую экранирующую сетку подается высокое напряжение (20 и 12 кВ, соответственно). На принципиальной схеме показано расположение зарядочувствительного усилителя (2), в котором осуществляется формирование электрического импульса с анода. На схеме также показано размещение высоковольтного источника питания (1), в котором осуществляется преобразование внешнего напряжения 24 В в –12 кВ и –20 кВ для подачи на экранирующую сетку и корпус, соответственно. В торце КГС-КТ установлен кран (3) для наполнения ионизационной камеры газообразным рабочим веществом (ксеноном).

Конструкция основных блоков КГС-КТ. Наиболее важными элементами КГС-КТ являются керамические гермоввод и изолятор. Разработка конструкций этих элементов осуществлялась с помощью параметрической системы автоматизированного проектирования (САПР FreeCAD) [7]. Эти блоки изготовлены из металлокерамики (корундовая

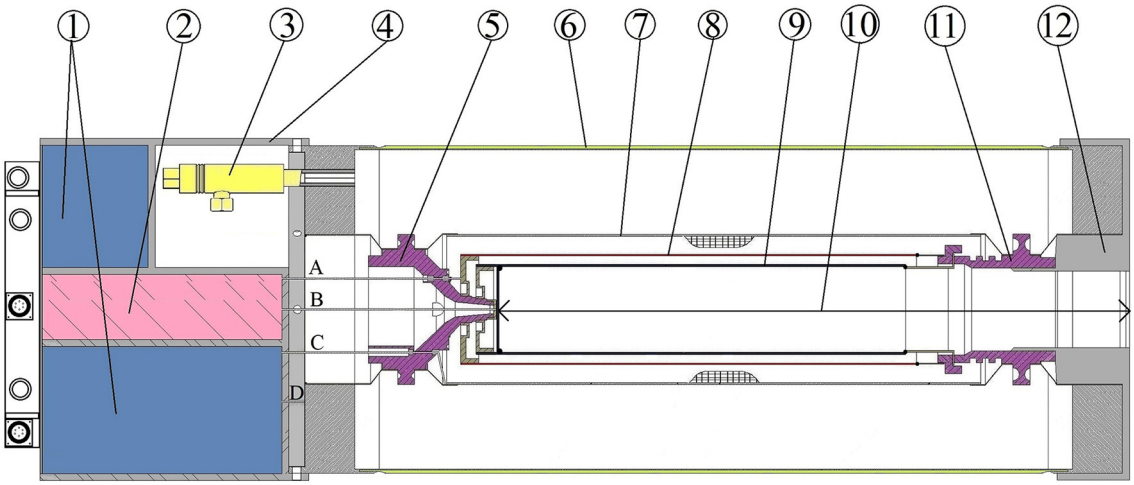

Рис. 1: *Принципиальная схема ксенонового гамма-спектрометра колодезного типа (КГС-КТ):* 1 – *блок высоковольтного питания;* 2 – *зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ);* 3 – *кран для наполнения рабочим веществом (ксеноном);* 4 – *тефлоновый цилиндр для размещения крана, высоковольтного источника питания и ЗЧУ;* 5 – *керамический гермоввод;* 6 – *корпус цилиндрической ионизационной камеры;* 7 – *экранирующая сетка;* 8 – *анод;* 9 – *колодец для размещения радиоактивных образцов;* 10 – *глубина колодца;* 11 – *керамический изолятор;* 12 – *тефлоновый изолятор; A – анодный контакт для снятия электрических сигналов; B – контакт для заземления; C – контакт экранирующей сетки (напряжение* 12 *кВ); D – контакт на корпус КГС-КТ (напряжение* 20 *кВ).*

керамика ВК94-1) и предназначены для изоляции элементов КГС-КТ с различными электрическими потенциалами.

Основные преимущества металлокерамики:

- выдерживает большие перепады температур;
- обладает высокими диэлектрическими свойствами;
- материал практически не вступает в реакцию с кислотами и щелочными реагентами;
- имеет высокую механическую прочность.

На рис. 2 показаны две проекции керамического гермоввода. На керамический гермоввод установлены металлические крепежные элементы в виде колец, изготовленных

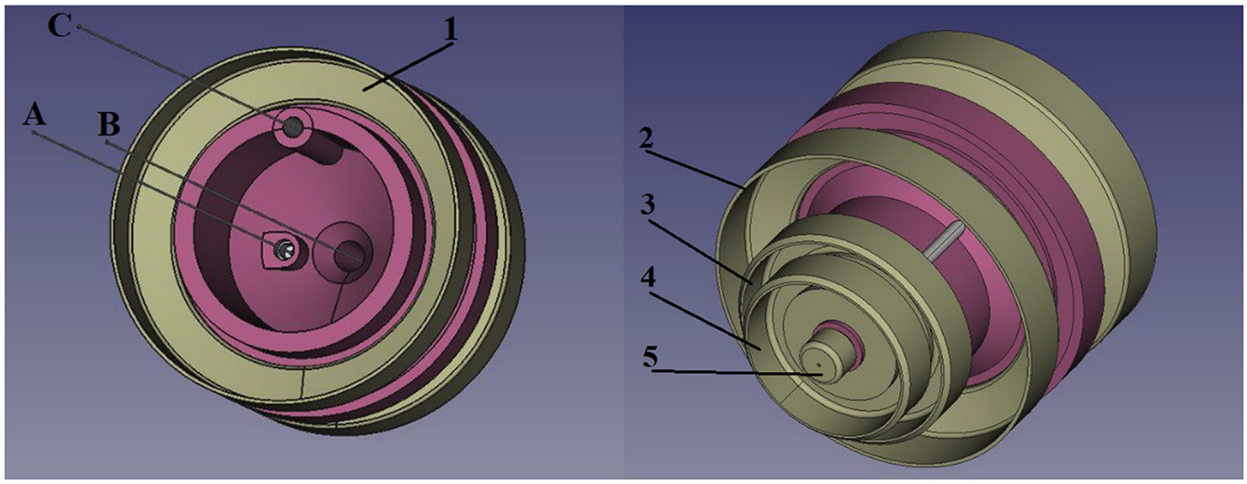

Рис. 2: *Модель керамического гермоввода:* 1 – *коваровое кольцо для соединения с корпусом КГС-КТ;* 2 – *коваровое кольцо для крепления экранирующей сетки;* 3 – *коваровое кольцо для крепления анода;* 4 – *крепежный элемент для установки колодца;* 5 – *ковровый элемент для заземления; A – анодный контакт для снятия электрических сигналов; B – контакт для заземления; C – контакт экранирующей сетки (напряжение –* 12 *кВ).*

из специального сплава (ковар). Общие габариты керамического гермоввода: диаметр 70 мм, высота 69 мм.

Керамический изолятор в двух проекциях показан на рис. 3. На керамический изолятор также установлены металлические крепежные элементы (коваровые кольца). Общие габариты керамического изолятора: диаметр 70 мм, высота 80 мм.

Цилиндрическая экранирующая сетка толщиной 0.2 мм, диаметром 68 мм и высотой 240 мм изготовлена из нержавеющей стали (12Х18Н10Т). Размеры сеточной ячейки составляют: $5{\times}4$ мм^2, с перегородками 0.2 мм.

Общая сборка КГС-КТ представлена на рис. 4.

По бокам КГС-КТ установлены фланцы корпуса. К левому фланцу приварен керамический гермоввод, к правому фланцу – керамический изолятор. В середине расположен анод (обозначен красным цветом), также показана экранирующая сетка. Анод в конструкции гамма-спектрометра колодезного типа представляет собой металлический цилиндр с наружным диаметром 50 миллиметров и толщиной стенки 1 мм. Анод крепится с двух сторон к коваровым кольцам гермоввода и изолятора.

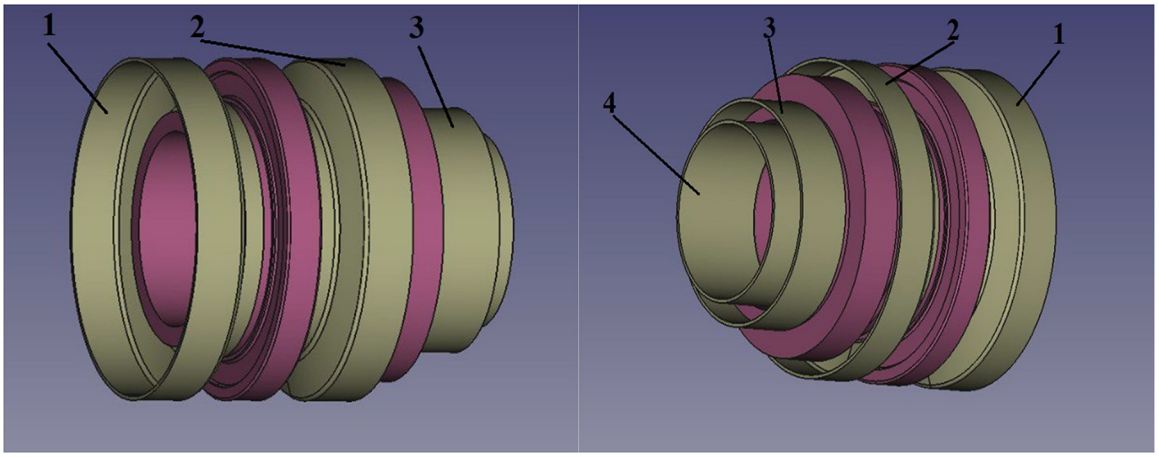

Рис. 3: *Модель керамического изолятора:* 1 – *коваровое кольцо для соединения с корпусом КГС-КТ:* 2 – *коваровое кольцо для крепления экранирующей сетки;* 3 – *коваровое кольцо для крепления анода;* 4 – *коваровое кольцо для крепления колодца.*

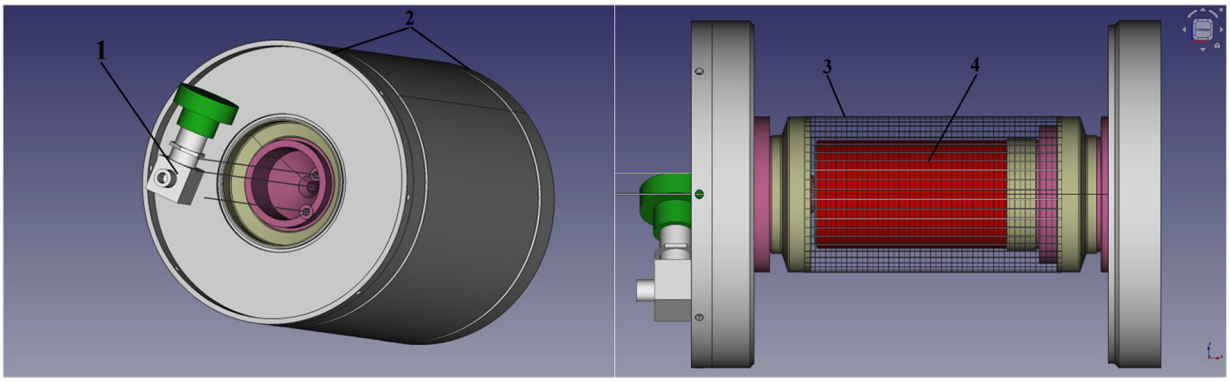

Рис. 4: *Модель детектора в сборе (с герметичным корпусом и без него):* 1 – *кран для наполнения ксеноном КГС-КТ;* 2 – *фланцы;* 3 – *экранирующая сетка;* 4 – *анод.*

При помощи параметрической системы автоматизированного проектирования (САПР FreeCAD) был подготовлен пакет конструкторской документации для изготовления прототипа КГС-КТ.

Оценка прочностных характеристик создаваемого гамма-спектрометра колодезного типа. Проведены расчеты основных прочностных характеристик: для цилиндрического корпуса ионизационной камеры и колодца. Расчеты выполнены в соответствии с ГОСТ 34233.2–2017 [8]. Получены следующие результаты: толщина корпуса ионизационной камеры 3 мм, что обеспечивает двукратный запас прочности, толщина стенки колодца 1.5 мм, что обеспечивает трехкратный запас прочности.

Моделирование физических процессов в КГС-КТ при помощи Geant4. Для определения основных физических характеристик создаваемого прототипа КГС-КТ использовался пакет Geant4 [9]. В рамках моделирования физических процессов взаимодействия гамма-излучения с элементами КГС-КТ проводился расчетный эксперимент с радиоактивным источником, расположенным внутри колодца. Для получения необходимой статистики в каждом расчетном эксперименте количество падающих на КГС-КТ гамма-квантов составляло 10^6. В качестве источника гамма-излучения использовался смоделированный радиоизотоп Ba-133. На рис. 5 представлено пространственное распределение гамма-квантов от точечного источника, расположенного в центре колодца КГС-КТ.

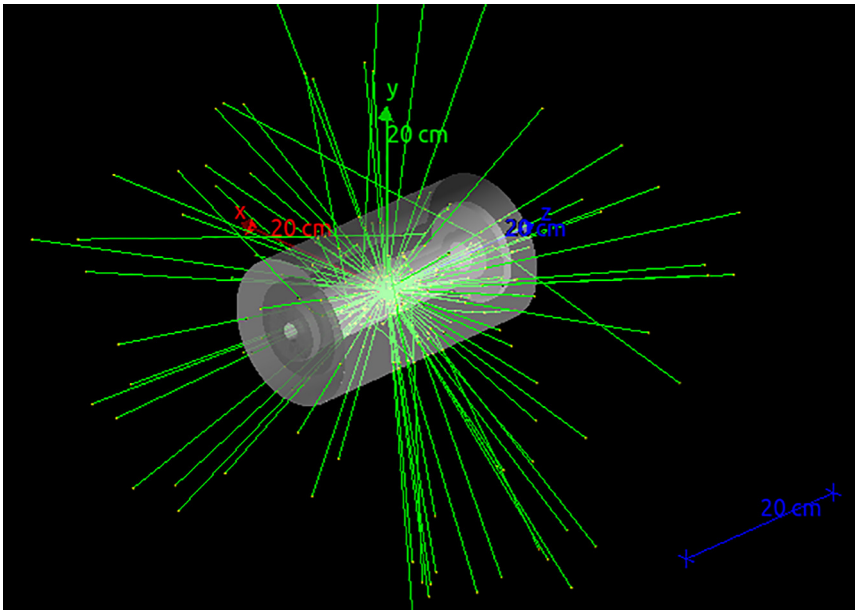

Рис. 5: *Распределение гамма-излучения от точечного источника, расположенного в центре колодца детектора (расчет выполнен при помощи пакета программ Geant4).*

Из рис. 5 видно, что часть гамма-квантов поглощается в рабочем веществе (ксенон), а остальные гамма-кванты покидают пределы гамма-детектора.

На рис. 6 изображен энергетический спектр гамма-источника (Ba-133), расположенного в центре колодца. На данном спектре показана зависимость количества зарегистрированных гамма-квантов от их энергии.

На спектре от стандартного гамма-источника Ba-133 отчетливо видны пять основных линий, что соответствует паспорту данного источника. Аналогичные измерения были проведены с этим же гамма-источником, расположенным на различной глубине

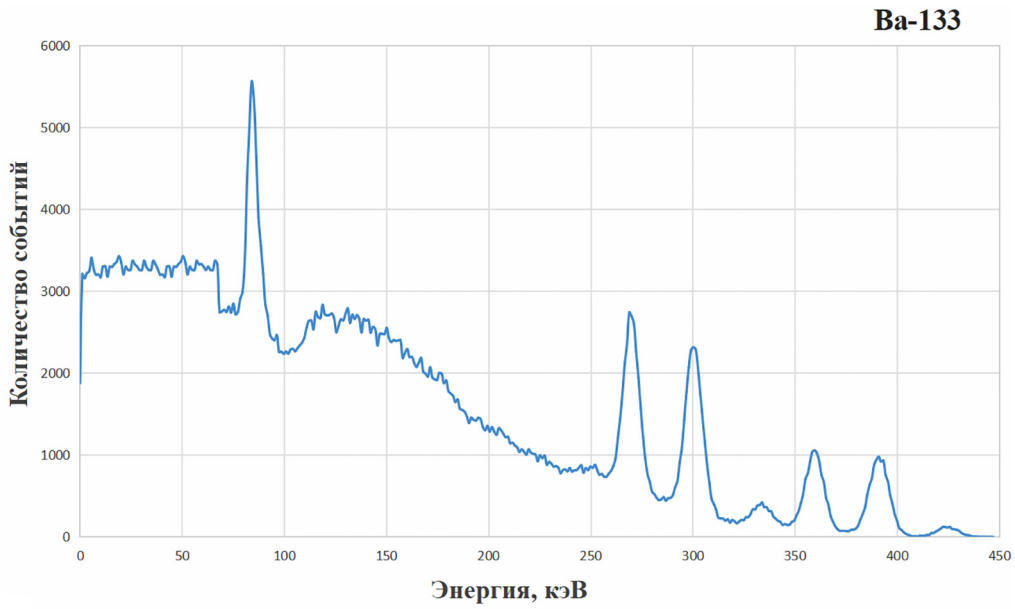

Рис. 6: *Смоделированный гамма-спектр от точечного источника Ba*-133*, расположенного в центре колодца.*

колодца. Зависимость абсолютной эффективности КГС-КТ от места расположения точечного гамма-источника внутри колодца показана на рис. 7.

На рис. 8 показано пространственное распределение гамма-квантов при расположении точечного источника Ba-133 за пределами КГС-КТ на расстоянии 25 см от корпуса детектора.

На рис. 9 показан спектр от гамма-источника Ba-133, расположенного на расстоянии 15 см сбоку от корпуса спектрометра. На данном спектре отражено количество зарегистрированных гамма-квантов соответствующей энергии.

Из приведенных спектров (рис. 9 и рис. 10) следует, что для защиты КГС-КТ от внешнего гамма-фона, в том числе и от различных гамма-источников, расположенных вне колодца, целесообразно поместить гамма-детектор в свинцовый цилиндр или защитить гамма-детектор свинцовыми кирпичами.

Испытания основных блоков КГС-КТ. Для КГС-КТ были изготовлены основные блоки: керамический гермоввод, керамический изолятор (рис. 3) и экранирующая сетка. В лабораторных условиях были проведены высоковольтные испытания этих элементов.

Для изготовленных керамических изделий измерялось напряжение между контактом для заземления (контакт B на рис. 2) и каждым коваровым кольцом. В результате испытаний установлено, что используемый гермоввод обеспечивает защиту от утечек

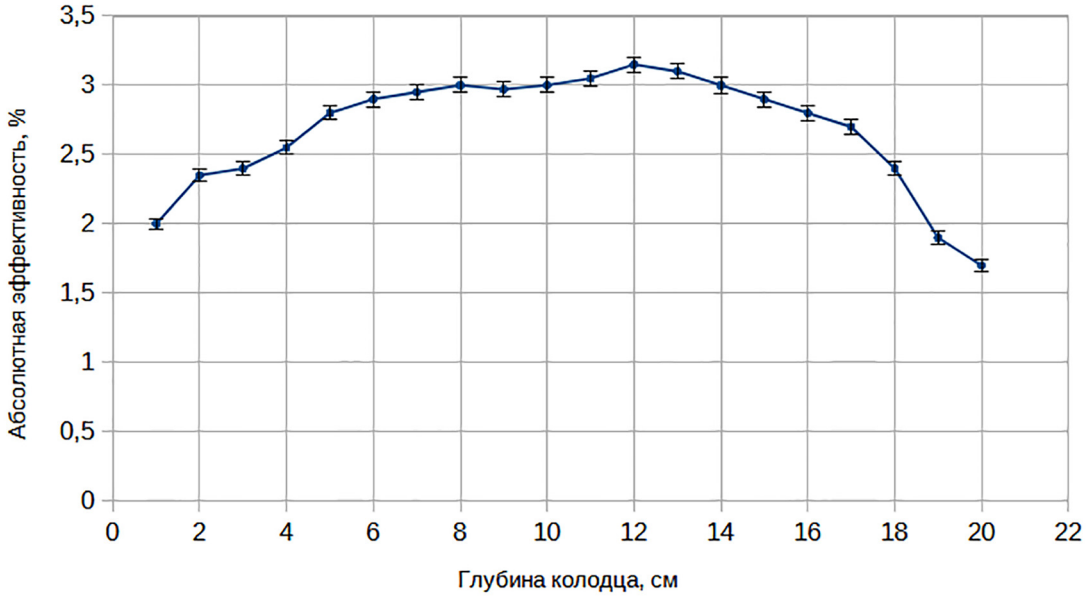

Рис. 7: *График рассчитанной зависимости абсолютной эффективности спектрометра от положения источника гамма-квантов в колодце. На графике отражены статистические погрешности каждого измерения.*

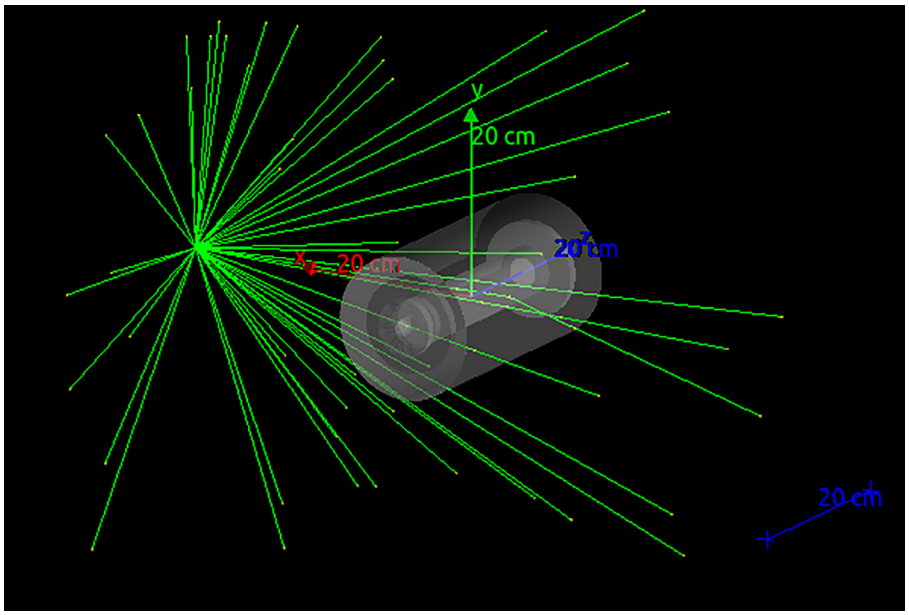

Рис. 8: *Распределение гамма-квантов от источника, расположенного на расстоянии* 25 *см от корпуса.*

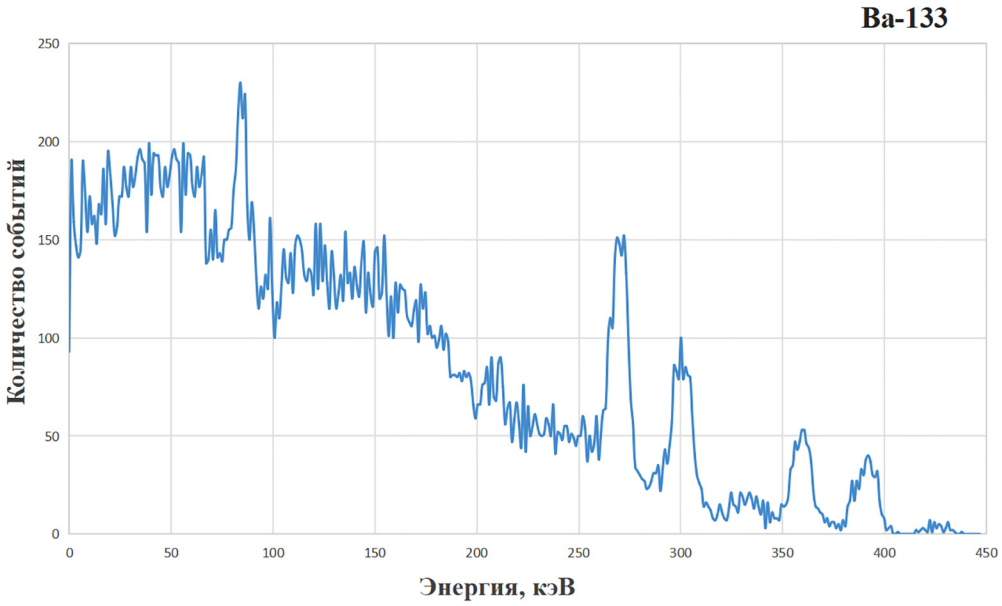

Рис. 9: *Смоделированный гамма-спектр от точечного источника* Ba-133, *расположенного на расстоянии* 15 *см от корпуса.*

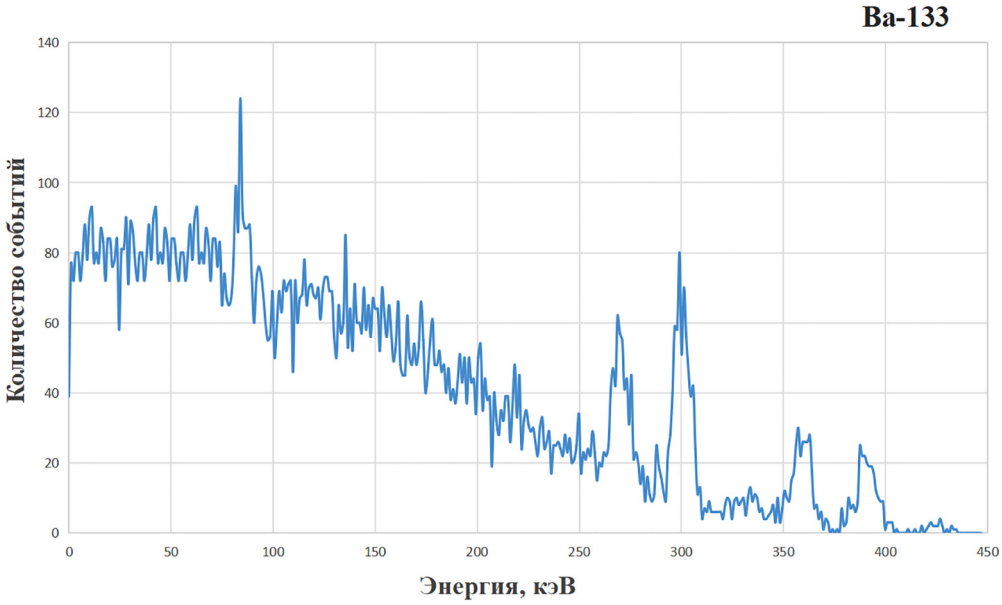

Рис. 10: *Смоделированный гамма-спектр от точечного источника* Ba-133, *расположенного на расстоянии* 25 *см от корпуса.*

напряжения с запасом в 1.5 раза. Аналогичные испытания были проведены с керамическим изолятором, которые показали такие же результаты.

Для керамических изделий были проведены испытания на герметичность спаев между керамикой и коваровыми кольцами, а также на герметичность электрических контактов гермоввода. Испытания на герметичность показали надежность спаев между коваровыми кольцами и металлическими контактами.

Также были проведены высоковольтные испытания экранирующей сетки. В процессе этих испытаний измерялось напряжение между анодом и сеткой. Было установлено, что при подаче напряжения 13±0.2 кВ (рабочее напряжение 12±0.2 кВ) электрические пробои не наблюдались.

Обсуждение полученных результатов. Результаты проведенных высоковольтных и герметичных испытаний показали, что изготовленные керамические блоки соответствуют расчетным параметрам, заложенным при проектировании КГС-КТ.

В настоящее время проводится подготовка рабочего вещества для наполнения импульсной ионизационной камеры КГС-КТ (ксенон особой чистоты с небольшой добавкой водорода).

Детальные расчеты, выполненные при помощи пакета программ Geant4, показали, что конструкция КГС-КТ существенно увеличивает эффективность регистрации гамма-квантов от исследуемых радиоактивных образцов, помещенных в колодец, по сравнению с ксеноновыми гамма-спектрометрами без колодца. Абсолютная эффективность у ксенонового гамма-спектрометра колодезного типа практически в 10 раз больше, чем у ксенонового гамма-спектрометра без колодца с равной массой рабочего вещества.

Таблица 1

Абсолютная эффективность КГС-КТ в зависимости от расположения смоделированного гамма-источника Ba-133

Гамма-источник Ba-133 расположен внутри колодца	
Глубина колодца, см	Абсолютная эффективность, %
1	2.01 ± 0.04
5	2.86 ± 0.05
10	3.01 ± 0.05
15	2.95 ± 0.05
20	1.71 ± 0.04

Из табл. 1 и 2 следует, что абсолютная эффективность КГС-КТ при расположении смоделированного гамма-источника Ba-133 внутри колодца в несколько раз выше,

чем при расположении гамма-источника за пределами детектора. Например, в центре колодца абсолютная эффективность составляет 3.01±0.05%, а на расстоянии 15 см от корпуса детектора 0.31±0.02%. Приведенные значения абсолютной эффективности отличаются практически в 10 раз. Также уменьшается время экспозиции исследуемого источника. Это означает, что с помощью разработанного КГС-КТ возможно определить характеристики радиоактивных фармпрепаратов, имеющих более короткие периоды полураспада.

Таблица 2

Абсолютная эффективность КГС-КТ в зависимости от расположения смоделированного гамма-источника Ba-133

Гамма-источник Ba-133 расположен на расстоянии от корпуса детектора	
Расстояние от корпуса детектора, см	Абсолютная эффективность, %
5	0.74 ± 0.03
15	0.31 ± 0.02
20	0.23 ± 0.01
25	0.11 ± 0.01
30	0.04 ± 0.01

Заключение. В данной работе при помощи пакета Geant4 проведено моделирование процессов взаимодействия гамма-квантов источника Ba-133 с рабочим веществом и элементами импульсной ионизационной камеры, наполненной сжатым ксеноном. Гамма-источник располагался внутри колодца и за пределами ионизационной камеры. Получены энергетические спектры от этого гамма-источника. Определена зависимость абсолютной эффективности ксенонового гамма-спектрометра колодезного типа от расположения гамма-источника Ba-133 внутри колодца.

В связи с ограниченными возможностями приобретения германиевых детекторов в настоящее время, и учитывая необходимость использования криогенных температур для их функционирования, разрабатываемый прибор является достойной заменой, что будет обеспечивать технологический суверенитет России.

На создаваемый прибор получен патент на полезную модель [10].

Авторы выражают благодарность руководству НИЯУ “МИФИ” за предоставление современной компьютерной техники, с помощью которой были проведены модельные эксперименты с большим объемом расчетных работ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

[1] И. Ф. Химматов, С. Е. Улин, Ядерная физика **87**(05), 59 (2024). https://doi.org/10.1134/S1063778824700601.

[2] М. Бикчурина, Т. Быков, И. Ибрагим и др., Front. Nucl. Eng. **2**, № Октябрь, 1 (2023). https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1266562.

[3] J. M. Seekamp, J. D. Noey, E. H. Kwapis, et al., Health Phys. **119**(2), 252 (2020). https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001271.

[4] M. Díaz-Asencio, J.-A. Sanchez-Cabeza, A. C. Ruiz-Fernández, et al., J. Environ. Radioact. **225**, 106385 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106385.

[5] Gamma-beta and alpha spectrometer-radiometer TRIO [Электронный ресурс]. URL: https://timet.by/en/production/gamma_spectrometers/gamma_beta_and_alpha_spectrometer_radiometer_trio/ (дата обращения: 16.03.2025).

[6] Baltic Scientific Instruments [Электронный ресурс]. URL: https://www.directindustry.com.ru/prod/baltic-scientific-instruments/product-222622-2457472.html (дата обращения: 16.03.2025).

[7] The FreeCAD manual [Электронный ресурс]. URL: https://wiki.freecad.org/Manual:Introduction/ru (дата обращения: 16.03.2025).

[8] ГОСТ 34233.2–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – Введ. 2018-08-01 (М., Стандартинформ, 2018). – 58 с.

[9] GEANT4 TOOLKIT [Электронный ресурс]: Пакет моделирования взаимодействия частиц с веществом (дата обращения: 16.03.2025).

[10] Патент РФ на полезную модель № 200652 от 03.11.2020. Ксеноновый гамма-спектрометр колодезного типа.

Поступила в редакцию 13 ноября 2024 г.
После доработки 24 марта 2025 г.
Принята к публикации 25 марта 2025 г.