DOI: 10.58168/PBHT2026_166-176
УДК 539.12.04

ГАММА-АБСОРБЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ТРУБЧАТЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В КОЛЛИМИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИИ

GAMMA-ABSORPTION INSPECTION OF INTERNAL INHOMOGENEITIES IN TUBULAR STRUCTURES USING COLLIMATED GEOMETRY

Писклюков А.А., заведующий лабораторией ядерной спектрометрии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Pisklyukov A.A., Head of the Nuclear Spectrometry Laboratory, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Калинин С.Д., магистрант, физический факультет, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Kalinin S.D., Master Student, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Кострюков П.В., кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры ядерной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Kostryukov P.V., PhD in Physics and Mathematics, Lecturer of the Nuclear Physics Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Вахтель В.М., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры ядерной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Vakhtel V.M., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate Professor of the Nuclear Physics Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе представлено экспериментальное исследование возможностей гамма-абсорбционного метода для контроля внутренней структуры трубчатых стальных изделий. Реализована установка с коллимированным пучком γ-излучения и сцинтилляционным детектором NaI(Tl), обеспечивающая регистрацию спектров с достаточной энергетической и статистической точностью. В качестве источников использовались радионуклиды ^{133}Ba и ^{152}Eu, позволяющие исследовать широкий диапазон энергий γ-квантов. Показано, что введение внутрь трубы дополнительного стального элемента приводит к систематическому уменьшению площади фотопиков, достигающему порядка 7-11 %. Установлена выраженная энергетическая зависимость ослабления, обусловленная механизмами взаимодействия γ-излучения с веществом, а также оценена чувствительность метода.

Ключевые слова: гамма-абсорбционный метод, неразрушающий контроль, коллимированный пучок, гамма-спектрометрия, NaI(Tl) детектор, ослабление излучения, трубчатые конструкции.

© Писклюков А. А., Калинин С. Д., Кострюков П. В., Вахтель В. М., 2026

Abstract. The paper presents an experimental study of the capabilities of the gamma-absorption method for inspecting the internal structure of tubular steel components. An experimental setup with a collimated gamma-ray beam and a NaI(Tl) scintillation detector was implemented, providing sufficient energy and statistical accuracy of the recorded spectra. The radionuclides ^{133}Ba and ^{152}Eu were used as sources, enabling analysis over a wide gamma energy range. It is shown that the insertion of an internal steel element into the tube leads to a systematic decrease in the full-energy peak areas, reaching about 7-11 %. A pronounced energy dependence of attenuation, determined by the interaction mechanisms of gamma radiation with matter, has been established, and the sensitivity of the method has been evaluated.

Keywords: gamma-absorption method, non-destructive testing, collimated beam, gamma spectrometry, NaI(Tl) detector, radiation attenuation, tubular structures.

Введение

Неразрушающий контроль является одним из ключевых направлений диагностики технических объектов в промышленности, включая энергетические установки, трубопроводные системы и технологическое оборудование. Среди методов неразрушающего контроля радиационные методы занимают особое место [1, 2] благодаря высокой проникающей способности ионизирующего излучения и возможности получения информации о внутренней структуре объектов без их разрушения.

Гамма-абсорбционный метод относится к числу классических методов радиационного контроля и широко применяется с середины XX века для исследования различных материалов и сред. Метод основан на экспоненциальном ослаблении интенсивности гамма-излучения при прохождении через вещество, что позволяет определять как геометрические, так и физические характеристики исследуемого объекта. Благодаря своей неразрушающей природе, высокой чувствительности и возможности многократных измерений данный метод получил широкое распространение в инженерных и технологических исследованиях [3].

В промышленности гамма-абсорбционные методы используются, в частности, для диагностики технологических колонн, трубопроводов и реакторов, где требуется выявление внутренних дефектов, неоднородностей или нарушений структуры без остановки технологического процесса [4]. При этом одним из ключевых факторов, определяющих точность и информативность измерений, является геометрия эксперимента.

Использование коллимированного пучка гамма-излучения позволяет существенно снизить вклад рассеянного излучения и обеспечить регистрацию преимущественно первичных фотонов, прошедших через исследуемую область объекта. Это является необходимым условием корректного применения закона ослабления и повышения пространственного разрешения метода [3, 5]. В противном случае вклад многократного рассеяния приводит к искажению измеряемых характеристик и снижению чувствительности метода к локальным неоднородностям.

Особую практическую значимость представляет задача контроля трубчатых стальных изделий, внутри которых могут находиться инородные элементы, продукты коррозии или технологические дефекты. В ряде случаев традиционные методы контроля, такие как ультразвуковой или вихретоковый, оказываются ограниченными [1] в применении вследствие

геометрии объекта или наличия внутренних полостей. В этих условиях гамма-абсорбционный метод в коллимированной геометрии может рассматриваться как перспективный инструмент диагностики.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка чувствительности гамма-абсорбционного метода к наличию внутренних стальных объектов в трубчатых конструкциях при использовании коллимированного пучка гамма-излучения, а также анализ энергетической зависимости наблюдаемого эффекта ослабления.

Получение коллимированного пучка и методика измерений

Контроль внутренней структуры трубчатых изделий требует формирования направленного пучка γ-излучения, обеспечивающего локализованное взаимодействие с исследуемой областью. В настоящей работе в качестве объекта исследования использовалась стальная труба внешним диаметром 9 мм и толщиной стенки около 1 мм, рассматриваемая как модельный элемент тепловыделяющего элемента (ТВЭЛа). Такой выбор обусловлен стремлением воспроизвести условия, характерные для реальных технических систем, где требуется отслеживать целостность и правильное расположение внутренних элементов.

Для реализации была создана экспериментальная установка, обеспечивающая формирование коллимированного пучка γ-излучения и регистрацию его ослабления при прохождении через исследуемый объект. Формирование пучка осуществлялось с использованием коллимационной системы из свинцовых блоков. Коллиматор состоял из четырёх свинцовых блоков размерами $2 \times 3 \times 10$ см, расположенных попарно таким образом, что между ними формировалась щель шириной 2 мм. Два блока располагались ниже исследуемого объекта, а два — выше него. Подобная геометрия обеспечивала прохождение γ-излучения через ограниченную область образца, существенно снижала вклад рассеянного излучения и позволяла реализовать условия узкопучкового приближения. Последнее является принципиально важным, поскольку именно в такой геометрии корректно применяется закон экспоненциального ослабления [3, 5]. В нижней части установки располагался сцинтилляционный детектор, над которым размещались нижние свинцовые блоки коллиматора. Над верхними блоками фиксировался источник γ-излучения. Такое расположение элементов обеспечивало прохождение пучка через центральную область трубы и минимизировало влияние геометрических смещений при проведении измерений.

В качестве источников γ-излучения использовались радионуклиды ^{133}Ba и ^{152}Eu. Выбор этих источников был обусловлен их развитой спектральной структурой и наличием набора хорошо идентифицируемых γ-линий в широком диапазоне энергий [7, 8]. Источник ^{133}Ba обеспечивает интенсивные линии в низкоэнергетической области, в частности вблизи 81 и 356 кэВ, что делает его удобным для анализа ослабления в диапазоне энергий, наиболее чувствительном к поглощению. Источник ^{152}Eu, напротив, характеризуется наличием большого числа γ-линий в широком диапазоне энергий – от десятков кэВ до порядка 1.4 МэВ, что позволяет исследовать энергетическую зависимость наблюдаемого эффекта.

Регистрация γ-излучения осуществлялась сцинтилляционным детектором на основе кристалла NaI(Tl), обладающим высокой эффективностью регистрации в диапазоне энергий от десятков кэВ до единиц МэВ [2, 6]. Сигнал с детектора поступал на многоканальный анализатор с числом каналов 4096, что обеспечивало достаточную дискретизацию спектра для

последующего выделения пиков и количественного анализа. Накопление спектров и их первичная регистрация проводились в стандартном спектрометрическом режиме. Вопросы энергетической калибровки и идентификации γ-линий рассматриваются в следующем разделе.

Методика проведения эксперимента основывалась на сравнении спектров, полученных в двух конфигурациях. Сначала исследуемая труба помещалась в зону прохождения коллимированного пучка, после чего регистрировался спектр для конфигурации без внутреннего объекта. Затем внутрь трубы вводился дополнительный металлический элемент – цилиндрическая стальная пружина. Измерения повторялись при неизменной геометрии установки. Для каждой конфигурации выполнялась серия измерений с фиксированным временем накопления порядка 600 секунд. После завершения серии измерений для одного источника аналогичная процедура повторялась для второго источника γ-излучения.

Таким образом, схема эксперимента позволяла сопоставлять характеристики зарегистрированного излучения для трубы без внутреннего объекта и для трубы с внутренним металлическим включением при одинаковых условиях измерения.

Калибровка спектрометрической системы и идентификация линий

Для обеспечения корректного анализа зарегистрированных спектров γ-излучения была проведена энергетическая калибровка спектрометра, а также идентификация характерных линий излучения используемых источников. Дополнительно были оценены параметры, характеризующие разрешающую способность детектора.

Калибровка выполнялась с использованием известных γ-линий источников ^{133}Ba и ^{152}Eu, значения энергий которых брались из справочных ядерных данных [7]. Положение максимумов полного поглощения определялось по зарегистрированным спектрам, после чего устанавливалось соответствие между номером канала многоканального анализатора и энергией γ-квантов. В рассматриваемом диапазоне энергий зависимость носила квадратичный характер и описывалась выражением:

$$E = a \cdot N^2 + b \cdot N + c, \quad (1)$$

где N – номер канала, E – энергия γ-кванта, а a, b и c – коэффициенты калибровки, определяемые методом наименьших квадратов по набору опорных линий.

В качестве калибровочных точек использовались наиболее интенсивные и хорошо разрешённые линии источников (см. Рис. 1-2). Результаты идентификации приведены в Таблице 1. Полученное соответствие между экспериментальными и табличными значениями энергий подтверждает корректность выполненной калибровки и позволяет использовать найденную зависимость для определения энергии зарегистрированных квантов. Калибровка выполнялась для каждого из используемых источников. Это обусловлено тем, что спектры ^{133}Ba и ^{152}Eu регистрировались при различных настройках коэффициента усиления спектрометрического тракта: существенно меньшая активность источника ^{133}Ba потребовала увеличения усиления для обеспечения достаточной скорости счёта.

Дополнительно проводилась проверка стабильности спектрометрической системы, заключающаяся в сопоставлении положений максимумов и их ширины при последовательных измерениях. Отсутствие заметных смещений положений линий свидетельствует о стабильности энергетической шкалы в течение эксперимента.

Таблица 1 – Идентификация линий γ-излучения

№ пика	Номер канала	$E_{\text{табл}}$, кэВ	$E_{\text{эксп}}$, кэВ	Отклонение, %
^{133}Ba				
1	84	81.0	80.96	< 0.001
2	448	303.1	303.3	< 0.001
3	534	356.0	355.8	< 0.001
^{152}Eu				
1	98	121.8	126.0	0.004
2	163	244.7	233.8	0.005
3	216	344.3	350.8	0.006

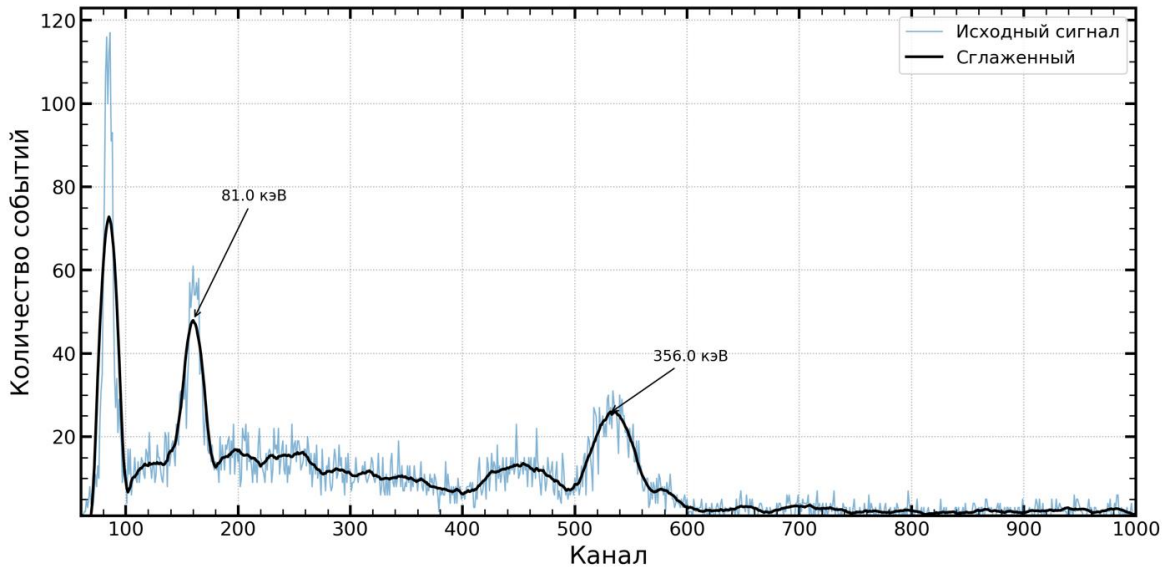


Рисунок 1– Спектр γ-излучения источника ^{133}Ba, измеренный NaI(Tl) детектором

Разрешающая способность сцинтилляционного детектора оценивалась по ширине максимумов полного поглощения на половине высоты. Для количественной оценки использовалась величина:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где ΔE – ширина максимума на половине высоты.

Результаты оценки разрешающей способности приведены в Таблице 2. Полученные значения разрешающей способности находятся в диапазоне, характерном для сцинтилляционных детекторов на основе NaI(Tl), что подтверждает корректную работу используемого спектрометрического оборудования [2, 6].

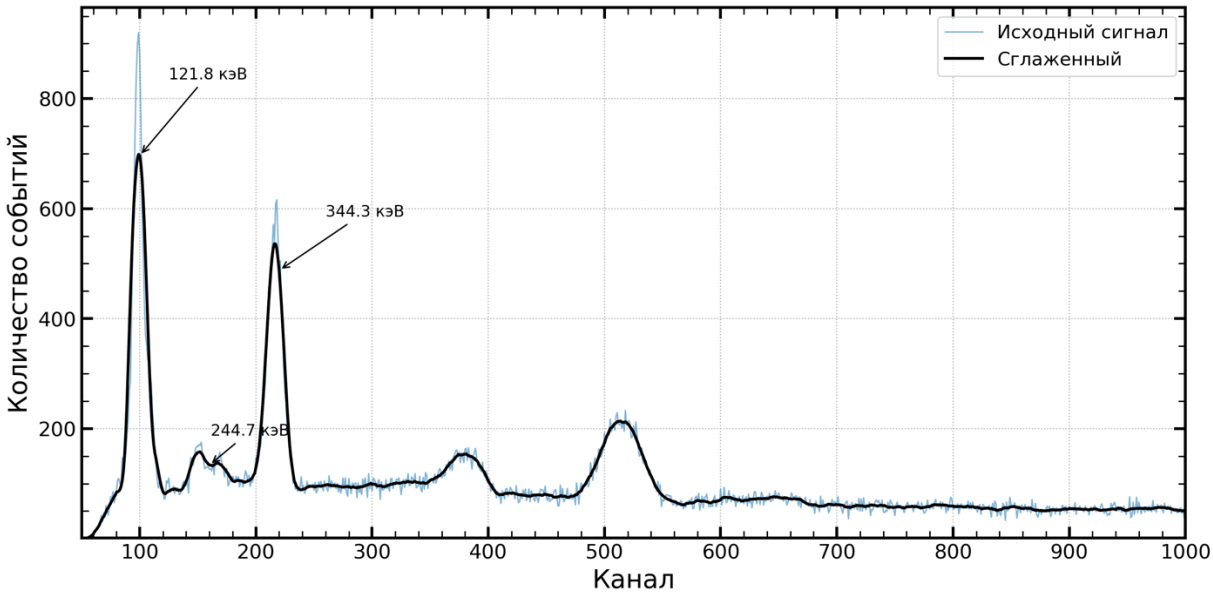


Рисунок 2 – Спектр γ-излучения источника ^{152}Eu, измеренный NaI(Tl) детектором

Таблица 2 – Разрешающая способность детектора NaI(Tl)

	^{133}Ba		^{152}Eu	
E, кэВ	81.0	356.0	121.8	344.3
ΔE, кэВ	16.5	32.8	18.2	32.1
R, %	20.4	9.2	14.9	9.3

Определение интенсивности пиков

После регистрации спектров γ-излучения для двух конфигураций – трубы без внутреннего объекта и трубы с введённой внутрь стальной пружиной – было установлено систематическое уменьшение интенсивности энергетических максимумов, что демонстрируют рисунки 3 и 4. Для количественной оценки эффекта использовалась процедура определения интенсивности линий, основанная на интегральных характеристиках спектра.

В этом качестве удобно использовать площади максимума полного поглощения S, определяемая интегрированием числа зарегистрированных импульсов в окне, соответствующем энергетическому интервалу $E_\gamma \pm 2\sigma$, где σ – среднеквадратичное отклонение гауссова контура линии. Такой подход обусловлен меньшей чувствительностью интегральной характеристики к локальным статистическим флуктуациям по сравнению с высотой максимума [2, 9].

Корректность использования площади как меры интенсивности основана на предположении о сохранении формы пика при изменении условий измерения. Как можно заметить из спектров, представленных на рисунках 3 и 4, положение максимумов и их ширина оставались неизменными в пределах статистической погрешности, что позволяет считать, что изменение площади связано именно с изменением числа зарегистрированных квантов, а не с искажением формы спектра.

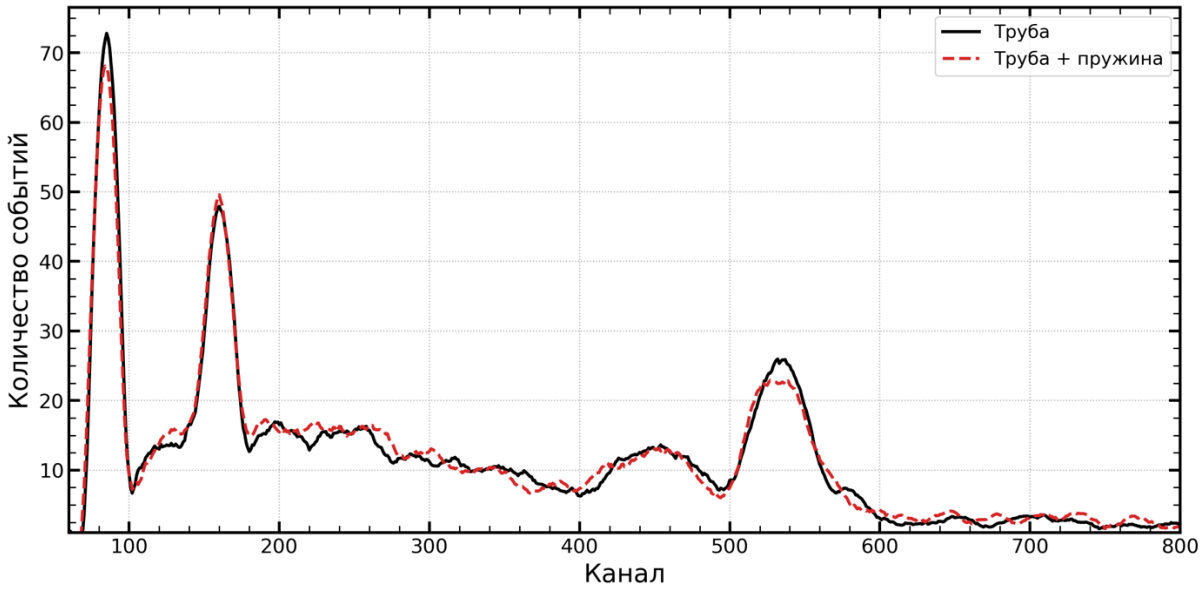


Рисунок 3 – Сглаженные спектры γ-излучения источника ^{133}Ba, зарегистрированные детектором NaI(Tl), для трубы без (сплошная линия) и с пружиной (штриховая линия)

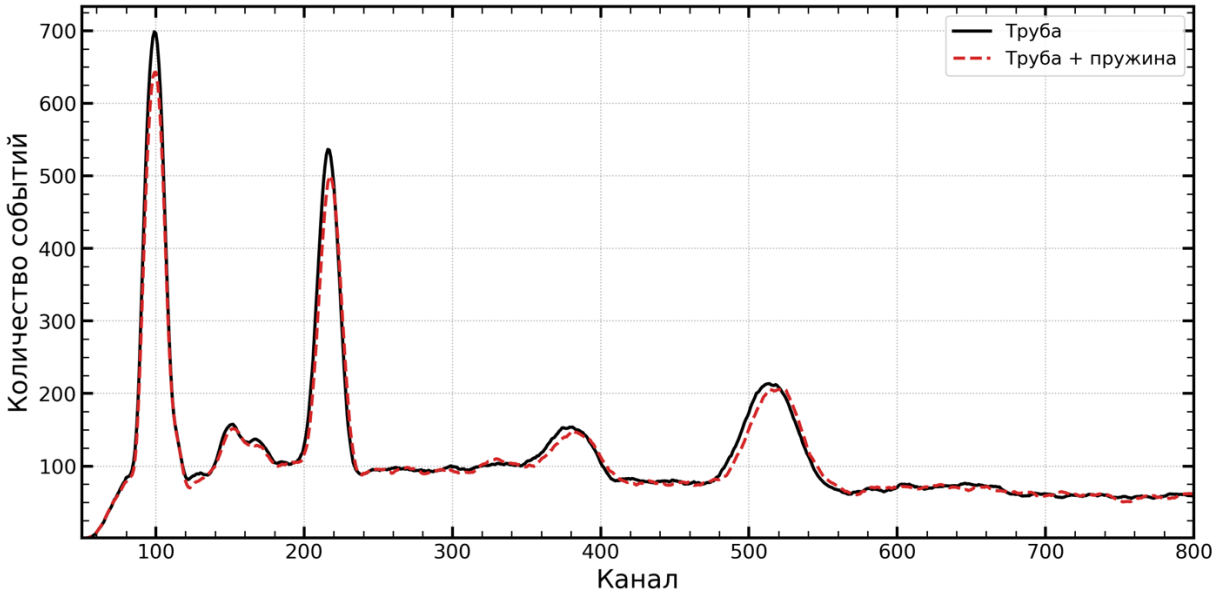


Рисунок 4 – Аналогичные сглаженные спектры для источника ^{152}Eu

Фоновый вклад, обусловленный рассеянием γ-квантов и шумами регистрации, учитывался посредством линейной интерполяции участков спектра, прилегающих к рассматриваемому максимуму. Предполагается, что фон в узком энергетическом интервале изменяется плавно, что оправдывает использование линейной аппроксимации. Вычитание фоновой составляющей позволяет выделить вклад, связанный исключительно с квантами заданной энергии.

Поскольку процесс регистрации γ-квантов подчиняется пуассоновской статистике, статистическая неопределённость оценивалась через число зарегистрированных событий. Относительная среднеквадратичная флуктуация определялась выражением:

$$\delta = N^{-1/2} \times 100\%\,, \qquad (3)$$

где N — число импульсов в области интегрирования. Полученные значения не превышают 2.2 %, что соответствует ожидаемому уровню флуктуаций для заданного времени накопления и подтверждает достаточную статистическую обеспеченность измерений.

Площади максимумов полного поглощения, полученные после вычитания фона и усреднения, приведены в Таблице 4.

Таблица 3 – Площади максимумов полного поглощения

	^{133}Ba		^{152}Eu	
E, кэВ	81.0	356.0	121.8	344.3
$S_{\text{тр}}$	2418 ± 49	4685 ± 68	10642 ± 103	10723 ± 104
$S_{\text{тр+пр}}$	2135±46	4162 ± 64	9808 ± 99	9867 ± 99
A, %	11.7	11.2	7.8	8.0

Сопоставление площадей показывает, что введение пружины приводит к систематическому уменьшению числа зарегистрированных квантов для всех анализируемых линий. Это уменьшение не является случайным, так как его величина существенно превышает уровень статистических флуктуаций, приведённых в таблице 1.

Для количественного описания эффекта введена величина относительного ослабления

$$A = \left(1 - \frac{S_{\text{тр+пр}}}{S_{\text{тр}}}\right) \times 100\%, \qquad (4)$$

которая характеризует долю потерь интенсивности при прохождении излучения через дополнительный материал.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что гамма-абсорбционный метод в коллимированной геометрии обладает устойчивой чувствительностью к наличию внутренних металлических объектов в трубчатых конструкциях. Наблюдаемое уменьшение интенсивности фотопиков при введении дополнительного стального элемента носит систематический характер и существенно превышает уровень статистических флуктуаций, что позволяет рассматривать данный эффект как надёжный диагностический признак.

Ключевой особенностью полученных данных является выраженная энергетическая зависимость ослабления гамма-излучения. Для источника ^{133}Ba, характеризующегося сравнительно низкими энергиями гамма-квантов, величина ослабления достигает 11 %, тогда как для источника ^{152}Eu в области средних и высоких энергий она находится на уровне 7-8 %. Данное различие обусловлено изменением соотношения механизмов взаимодействия гамма-излучения с веществом. В области энергий до ~100 кэВ доминирует фотоэффект, сечение которого резко возрастает при уменьшении энергии, что приводит к более интенсивному поглощению излучения. В диапазоне сотен кэВ основным процессом становится комптоновское рассеяние, характеризующееся более слабой зависимостью от энергии и меньшей эффективностью ослабления [2, 6].

Существенным фактором, определяющим наблюдаемую чувствительность метода, является использование коллимированной геометрии эксперимента. Формирование узкого пучка γ-квантов позволяет минимизировать вклад рассеянного излучения и обеспечить преимущественную регистрацию фотонов, прошедших через строго ограниченную область объекта. В отсутствие коллимации значительная часть зарегистрированного сигнала формировалась бы за счёт многократного рассеяния, что приводило бы к сглаживанию различий между исследуемыми конфигурациями и снижению чувствительности метода [3, 5]. Таким образом, реализация узкопучковой геометрии является принципиальным условием корректного применения гамма-абсорбционного подхода для диагностики локальных неоднородностей.

С практической точки зрения важным результатом является оценка минимально детектируемого изменения интенсивности. Проведённый анализ показывает, что при уровне статистических флуктуаций порядка 1-2 % можно уверенно регистрировать изменения интенсивности на уровне 5 % с доверительной вероятностью порядка 0,95. Это позволяет оценить чувствительность метода к эффективной толщине дополнительного ослабляющего материала. Для рассматриваемой конфигурации и энергетического диапазона полученная чувствительность соответствует эквивалентной толщине стали порядка 0.5-0.7 мм, что является достаточно высоким показателем для задач неразрушающего контроля.

Следует отметить, что полученные значения ослабления и чувствительности зависят не только от энергии гамма-квантов, но и от геометрии эксперимента, включая ширину коллимационной щели, взаимное расположение источника, объекта и детектора, а также размеры исследуемой неоднородности. В реальных условиях эксплуатации дополнительные факторы, такие как неоднородность материала, сложная геометрия изделий и наличие рассеянного излучения, могут приводить к изменению наблюдаемого эффекта. Тем не менее, представленные результаты демонстрируют принципиальную реализуемость метода и позволяют оценить его потенциальные возможности.

Важным направлением дальнейших исследований является развитие методов количественной интерпретации измеряемого ослабления с учётом многократного рассеяния и геометрических факторов. Это может быть реализовано как с использованием аналитических моделей, основанных на транспортных уравнениях, так и с применением численного моделирования, например, методом Монте-Карло. Подобный подход позволит повысить точность определения параметров внутренних неоднородностей и расширить область применения гамма-абсорбционного метода в задачах промышленной диагностики.

Таким образом, проведённое исследование показывает, что гамма-абсорбционный метод в коллимированной геометрии является эффективным инструментом для выявления внутренних металлических объектов в трубчатых конструкциях, обладающим достаточной чувствительностью и потенциалом для практического применения.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование возможностей гамма-абсорбционного метода для контроля внутренней структуры трубчатых стальных изделий в коллимированной геометрии. Реализована установка с узким пучком гамма-излучения и

сцинтилляционным детектором, обеспечивающая регистрацию спектров с достаточной энергетической и статистической точностью.

Показано, что наличие внутреннего стального элемента приводит к устойчивому ослаблению интенсивности фотопиков в диапазоне 8 % для источника ^{152}Eu и 11% для источника ^{133}Ba. Установлена выраженная энергетическая зависимость ослабления, обусловленная различием механизмов взаимодействия гамма-излучения с веществом.

Продемонстрировано, что использование коллимированной геометрии является принципиально важным условием повышения чувствительности метода за счёт подавления вклада рассеянного излучения и обеспечения регистрации преимущественно первичного пучка. На основе анализа статистических характеристик измерений показано, что метод позволяет уверенно регистрировать изменения интенсивности на уровне нескольких процентов.

Оценена чувствительность метода, которая для рассматриваемой экспериментальной конфигурации соответствует эффективной толщине стали порядка 0.5–0.7 мм, соответствующей параметрам вводного элемента. Полученный результат подтверждает возможность применения гамма-абсорбционного подхода для выявления внутренних металлических неоднородностей в трубчатых конструкциях. Таким образом, гамма-абсорбционный метод в коллимированной геометрии может рассматриваться как перспективный инструмент неразрушающего контроля, обладающий достаточной чувствительностью и потенциалом для практического применения в задачах диагностики технических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль. Т. 4. Радиационный контроль / В. В. Клюев. – Москва : Машиностроение, 2004. – 384 с.
2. Knoll, G. F. Radiation Detection and Measurement / G. F. Knoll. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2010. – 830 p.
3. Горшков, В. Г. Гамма-спектрометрия природных сред / В. Г. Горшков, С. В. Смирнов, В. А. Храмов. – Москва : Физматлит, 2012. – 352 с.
4. Industrial Applications of Sealed Radioactive Sources / International Atomic Energy Agency. – Vienna : IAEA, 2020. – 84 p. – (IAEA TECDOC series, ISSN 1011–4289 ; no. 1925). – ISBN 978-92-0-117020-0.
5. Машкович, В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
6. Лео, В. Техника ядерного эксперимента / В. Лео. – Москва : Наука, 1991. – 528 с.
7. Chu, S. Y. F. The Lund/LBNL Nuclear Data Search / S. Y. F. Chu, L. P. Ekström, R. B. Firestone. – URL: http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/ (дата обращения: 15.04.2026).
8. NuDat 3.0 / National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. – URL: https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/ (дата обращения: 15.04.2026).
9. Mortreau, P. Handbook of Gamma Spectrometry Methods for Non-destructive Assay of Nuclear Materials / P. Mortreau, R. Berndt. – EUR 19822 EN, rev. 4. – Ispra : Joint Research Centre, 2010. – 112 p.

REFERENCES

1. Klyuev, V. V. Nerazrushayushchii kontrol'. T. 4. Radiatsionnyi kontrol' / V. V. Klyuev. – Moscow : Mashinostroenie, 2004. – 384 p.
2. Knoll, G. F. Radiation Detection and Measurement / G. F. Knoll. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2010. – 830 p.
3. Gorshkov, V. G. Gamma spektrometriya prirodnykh sred / V. G. Gorshkov, S. V. Smirnov, V. A. Khramov. – Moscow : Fizmatlit, 2012. – 352 p.
4. Industrial Applications of Sealed Radioactive Sources / International Atomic Energy Agency. – Vienna : IAEA, 2020. – 84 p. – (IAEA TECDOC series, ISSN 1011–4289 ; no. 1925). – ISBN 978-92-0-117020-0.
5. Mashkovich, V. P. Zashchita ot ioniziruyushchikh izluchenii / V. P. Mashkovich, A. V. Kudryavtseva. – Moscow : Energoatomizdat, 1995. – 496 p.
6. Leo, W. R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach / W. R. Leo. – 2nd ed. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 1994. – 378 p.
7. Chu, S. Y. F. The Lund/LBNL Nuclear Data Search / S. Y. F. Chu, L. P. Ekström, R. B. Firestone. – Lund University. – URL: http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/ (accessed: 15.04.2026).
8. NuDat 3.0 / National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. – Upton, NY. – URL: https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/ (accessed: 15.04.2026).
9. Mortreau, P. Handbook of Gamma Spectrometry Methods for Non-destructive Assay of Nuclear Materials / P. Mortreau, R. Berndt. – EUR 19822 EN, rev. 4. – Ispra : Joint Research Centre, 2010. – 112 p.