

## Новый вариант установки для измерений сечений излучения $\gamma$ -квантов в ядерных реакциях под действием нейтронов с энергией 14.1 МэВ

Ю.Н. Копач,<sup>1</sup> Д.Н. Грозданов,<sup>1,2</sup> Н.А. Федоров,<sup>1,3</sup> Т.Ю. Третьякова,<sup>1,3,4</sup>  
 П.И. Харламов,<sup>1,4,\*</sup> А.В. Андреев,<sup>1,3</sup> Г. Ахмедов,<sup>1,5</sup> Д. Бериков,<sup>1,6</sup> С. Дабылова,<sup>1,6</sup>  
 Пр.К. Дас,<sup>1,7</sup> А. Кумар,<sup>1,8</sup> Г.В. Пампушик,<sup>3</sup> И.Н. Русков,<sup>1,2</sup> И.А. Сираков,<sup>2</sup>  
 В.Р. Ской,<sup>1</sup> П.Г. Филончик,<sup>1,9</sup> К. Храмко,<sup>1,10</sup> и коллаборация TANGRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований. Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>2</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергии Болгарской академии наук  
 Болгария, София, бул. Цариградское шоссе, 72, 1784

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>4</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

<sup>5</sup>Агентство инноваций и цифрового развития, отдел ядерных  
 исследований. Азербайджан, AZ0100 Баку, ул. 20-й км шоссе Баку-Шамаха

<sup>6</sup>Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева. Казахстан, г. Астана

<sup>7</sup>Университет науки и технологий Пабны, отделение физики. Бангладеш, 6600, Пабна

<sup>8</sup>Бенаресский индуистский университет, Институт естественных наук, отделение физики  
 Индия, 221005 Варанаси, Юттар Прадеш

<sup>9</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)  
 Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

<sup>10</sup>Институт химии Академии наук Молдовы. Республика Молдова, MD 2028, Кишинев, ул. Академическая, 3  
 (Поступила в редакцию 28.12.2023; после доработки 19.02.2024; подписана в печать 24.02.2024)

В рамках проекта TANGRA создана экспериментальная установка для измерения сечений реакций ( $n, X\gamma$ ) при взаимодействии нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами. Особенностью установки является применение метода меченых нейтронов, позволяющего эффективно разделять фоновые и полезные события, а также точно отслеживать поток нейтронов. Выполнены тестовые измерения на ядрах  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$ , которые показали удовлетворительное согласие с доступными экспериментальными данными. В настоящей статье обсуждаются особенности конструкции установки и методика обработки полученных экспериментальных данных.

PACS: 29.30.Kv, 29.40.Wk, 25.40.Fq. УДК: 539.1.07

Ключевые слова: метод меченых нейтронов, нейтрон-ядерные реакции, рассеяние нейтронов, гамма-спектроскопия, HPGe-детектор.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2430201](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2430201)

### ВВЕДЕНИЕ

Ядерно-физические методы для контроля состава различных материалов, вещества, среды с использованием нейтронов имеют важное значение для решения различных научных и прикладных задач. Разработка удобных в эксплуатации компактных генераторов нейтронов, основанных на реакциях взаимодействия легких ядер, позволила расширить применение пучков быстрых нейтронов в широком диапазоне прикладных задач. Это и элементный анализ в промышленности [1, 2], и поиск опасных веществ в сферах обеспечения безопасности, исследование нефтяных, газовых и рудных месторождений, определение влажности грунтов и почв [3]. Современная экологиче-

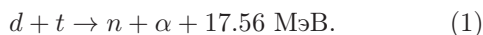
ская повестка привлекла внимание к задаче создания мобильных установок для определения содержания углерода в почве [4, 5]. Особое значение имеют исследования ядерных энергетических установок: в последние годы в связи с разработкой ядерных реакторов IV поколения [6] возникла необходимость в радикальном расширении и уточнении баз данных по взаимодействию быстрых нейтронов с веществом.

Исследования нейтрон-ядерных реакций, в процессе которых происходит излучение  $\gamma$ -квантов, активно ведутся в крупномасштабных проектах. Наиболее значимыми экспериментами, в рамках которых исследуются эти реакции, являются nELBE [7] и GELINA [8]. В этих проектах в качестве источника нейтронов используются фотоядерные реакции на свинце и уране, соответственно, спектр излучаемых нейтронов лежит в диапазоне от сотен килоэлектронвольт до  $\sim 20$  МэВ. Применение время-пролетной методики позволяет исследовать ядер-

\* E-mail: [pi.kharlamov@physics.msu.ru](mailto:pi.kharlamov@physics.msu.ru)

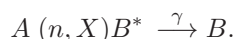
ные реакции в широком диапазоне энергий налетающего нейтрона и получать энергетические зависимости их характеристик. Применение детекторов  $\gamma$ -излучения высокого разрешения в этих экспериментах позволило измерить сечения излучения и величины анизотропии  $\gamma$ -квантов для большого числа  $\gamma$ -переходов.

Другим процессом, широко применяемым для получения быстрых нейтронов, особенно в компактных источниках, является реакция слияния дейтерия и трития



В результате данной реакции образуются потоки быстрых нейтронов с энергией около 14.1 МэВ. Для элементного анализа по спектрам характеристического  $\gamma$ -излучения необходимы базы данных сечений образования  $\gamma$ -квантов в процессах взаимодействия нейтронов с атомными ядрами. На данный момент накоплен значительный объем экспериментальных данных по реакциям типа  $(n, X\gamma)$ , где  $X$  —  $n, p, d, \alpha$  при энергии нейтронов 14.1 МэВ, наиболее полным источником информации об этих величинах является подборка [9]. Однако следует отметить, что содержащиеся в базе значения сечения для некоторых  $\gamma$ -переходов, измеренные в разных экспериментах в разное время, могут отличаться в несколько раз. Также актуальной является задача расширения объема базы данных за счет включения новых элементов и изотопов.

В рамках международного проекта ТАНГРА [10] в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) создана установка на основе компактного нейтронного генератора ИНГ-27 [11, 12] с возможностью реализации метода меченых нейтронов (ММН) [13–15]. Метод основан на регистрации  $\alpha$ -частиц, образующихся в реакции (1), и последующей регистрации на совпадение  $\gamma$ -квантов, испускаемых при девозбуждении продуктов ядерных реакций:



Определение направления вылета  $\alpha$ -частиц соответственно фиксирует и направление вылета нейтрона, таким образом происходит «мечение» нейтрона. ММН позволяет существенно снизить влияние фона и повысить точность экспериментальных данных. Использование компактного нейтронного генератора позволяет легко модифицировать экспериментальную установку и работать с детектирующими системами различной геометрии. Ранее были проведены исследования угловых распределений  $\gamma$ -квантов с использованием системы из 18 детекторов ВГО в кольцевой геометрии [16, 17], для определения значений выходов  $\gamma$ -квантов был создан вариант установки с детектором из сверхчистого германия (HPGe) без возможности измерения сечений [18, 19]. Основной целью данной работы является создание установки для измерений

сечений реакций  $(n, X\gamma)$  и обладающей большей эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения и лучшим энергетическим разрешением, чем ранее использованная нами конфигурация. В новой модификации мы используем для регистрации  $\gamma$ -квантов два детектора из сверхчистого германия. Стоит также отметить, что использование в качестве источника нейтронов промышленного генератора ИНГ-27 вносит свои особенности в процедуру проведения эксперимента, определяет геометрическое расположение элементов установки и требует специализированных процедур обработки данных.

## 1. ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

Генератор нейтронов с энергией 14.1 МэВ представляет собой компактный ускоритель дейтронов на энергию 30–90 кэВ с обогащенной тритием мишенью. Используемый в эксперименте ТАНГРА нейтронный генератор ИНГ-27 является серийным изделием ВНИИА им. Н.Л. Духова. В герметичном корпусе генератора содержится ионный источник, фокусирующая система, титановая мишень, обогащенная тритием, и полупроводниковый позиционно-чувствительный детектор  $\alpha$ -частиц.

Типичные параметры генератора ИНГ-27:

1. поток нейтронов — от  $5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$  в начале срока службы до  $2.5 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$  в конце;
2. время непрерывной работы — 8 часов;
3. ресурс генератора — 750 часов;
4. активность тритиевой мишени —  $7.4 \times 10^{11} \text{ Бк}$ ;
5. ускоряющее напряжение — 30–90 кВ.

Образование нейтронов происходит в результате реакции  $d+t \rightarrow \alpha+n$ . Угловое распределение ее продуктов близко к изотропному. Кинетическая энергия дейтронов много меньше энергии продуктов реакции, поэтому угол разлета  $\alpha$ -частицы и нейтрона близок к  $180^\circ$  в ЛСК. Регистрация  $\alpha$ -частицы позиционно-чувствительным детектором позволяет определить направление вылета нейтрона, соответствующего  $\alpha$ -частице, и дает временную метку  $T_\alpha$ , которая является «стартом» для определения времени пролета нейтрона до образца. Включение в схему совпадений  $\alpha$ -детектора и детекторов вторичных излучений позволяет отбирать события по времени — разности между моментом регистрации вторичного излучения  $T_\gamma$  и  $T_\alpha$ . Блок-схема экспериментов с использованием ММН показана на рис. 1.

Применение позиционно-чувствительного детектора для регистрации  $\alpha$ -частиц позволяет получать несколько меченых нейтронных пучков в одном

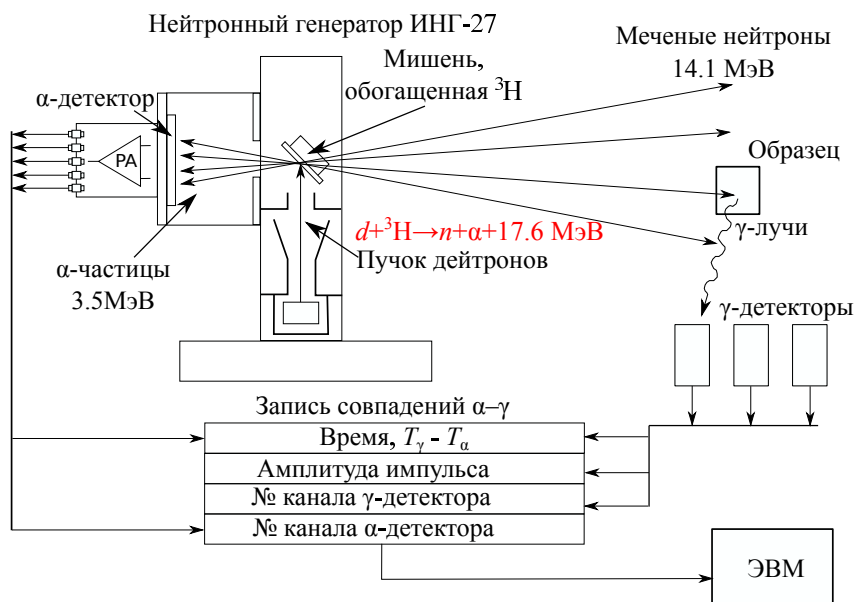


Рис. 1. Блок-схема эксперимента с использованием ММН

эксперименте. В настоящей работе мы использовали  $\alpha$ -детектор с девятью пикселями, образующими 9 меченых пучков.

Энергии меченых нейтронов зависят от ускоряющего напряжения и лежат в диапазоне от 14.0 до 14.3 МэВ, при этом центриод распределений имеет значения от 14.10 до 14.15 МэВ (см. рис. 2).

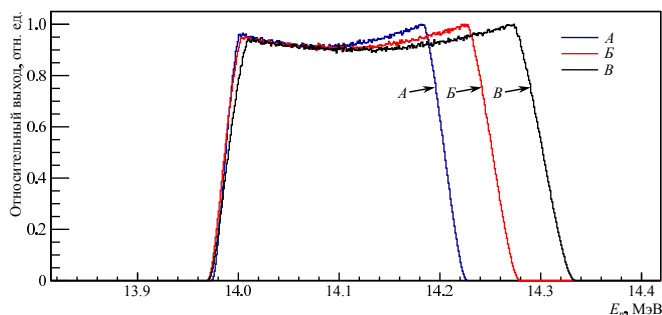


Рис. 2. Расчетные спектры нейтронов для ускоряющих напряжений 40 (А), 60 (Б) и 83 кВ (В). Нормировка выполнена на максимумы спектров

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Ранее мы использовали конфигурацию установки с одним HPGe-детектором [18]. Несмотря на успешный опыт ее применения для исследования нейтронно-ядерных реакций, были отмечены следующие недостатки:

1. Риск деградации германиевого детектора из-за нейтронного облучения вследствие его недостаточной защищенности.

2. Невозможность использования всех доступных меченых пучков.

Поэтому при создании новой установки особое внимание уделено устранению этих недостатков, также были проведены дополнительные модельные расчеты с целью минимизации поглощения  $\gamma$ -квантов в образце.

Первым шагом была оптимизация геометрии, состава и толщины многокомпонентной теневой защиты (коллиматора) с помощью программного пакета GEANT4. Форма теневой защиты, как и расположение мишени и детекторов определялись пространственным распределением меченых нейтронных пучков и разрабатывались с учетом следующих требований:

1. пучки меченых нейтронов не должны попадать в коллиматор;
2. площадь мишени должна перекрывать все пучки меченых нейтронов;
3. расстояние от мишени до детекторов должно быть минимальным;
4. при этом коэффициент подавления нейтронов в коллиматоре должен быть по возможности максимальным;
5. количество вторичных  $\gamma$ -квантов, образующихся при взаимодействии нейтронов с материалами защиты и попадающих в детекторы, должно быть минимальным.

Оптимальная защита должна обеспечивать минимальные  $\gamma$ - и нейтронные дозы облучения в германиевом детекторе. Первоначальная конфигурация теневой защиты предполагала наличие трех различных слоев: полиэтилена, замедляющего нейтроны,

рассеивающего слоя из стали (железа) и свинца, поглощающего  $\gamma$ -излучение, возникающее в железе при нейтрон-ядерных реакциях [20].

Моделирование выполнялось следующим образом: фиксировалась полная толщина защиты  $l_{sh}$ , после чего варьировались толщины слоев полиэтилена  $l_{PE}$ , стали  $l_{Fe}$  и свинца  $l_{Pb}$  таким образом, что  $l_{sh} = l_{PE} + l_{Fe} + l_{Pb}$ . По результатам расчетов определялся коэффициент ослабления  $k_{sh} = D_{sh}/D_0$ , где  $D_{sh}$  — полная доза (с учетом вторичных  $\gamma$ -квантов), получаемая детектором с защитой,  $D_0$  — доза, получаемая детектором без защиты. Отдельно проводился расчет коэффициента ослабления нейтронной дозы  $k_{sh}^n = D_{sh}^n/D_0^n$ . Опыт эксплуатации предыдущего варианта установки показал, что общая толщина защиты  $l_{sh}$  должна быть не менее 20 см [18]. Поэтому мы выполнили расчеты для трех значений  $l_{sh}$ : 20, 30 и 40 см. Результаты моделирования показали, что полиэтилен не дает существенного снижения поглощенной дозы излучения. Оптимальная толщина свинцовой компоненты защиты — 5 см. Из этих соображений в качестве компромисса между максимальной защитенностью германиевых детекторов и минимизацией расстояния между детекторами и образцом был выбран следующий состав теневой защиты:  $l_{sh} = 30$  см,  $l_{Fe} = 25$  см,  $l_{Pb} = 5$  см. Расчетные коэффициенты ослабления такой защиты:  $k_{sh} = 25$  и  $k_{sh}^n = 41$ . На рис. 3 приведена схема нового варианта установки.

Для регистрации  $\gamma$ -излучения применялись два детектора из сверхчистого германия ORTEC GMX60P4-83 [21] с относительной эффективностью 60% и энергетическим разрешением 2.2 кэВ (ширина на половине высоты) при 1.33 МэВ ( $^{60}\text{Co}$ ). Оно ухудшалось до  $\sim 5$  кэВ во время работы нейтронного генератора. Нейтронный генератор, защита и детекторы размещены на раме из конструкционного алюминиевого профиля. Размеры образца выбирались исходя из соображений максимизации его покрытия мечеными пучками и минимизации влияния поглощения  $\gamma$ -квантов и множественного рассеяния нейтронов в образце на получаемые результаты. По результатам моделирования было установлено, что условиям требования максимального покрытия нейтронными пучками удовлетворяют образцы с размерами  $22 \times 22$  см<sup>2</sup>, толщина образца определяется исходя из соображений оптимизации соотношения между поглощением  $\gamma$ -излучения и максимальной скорости набора статистики и составляет от 1 до 4 см. В качестве образца используется контейнер из полиэтилена с толщиной стенки 3 мм и указанными выше внутренними размерами, заполненный порошком исследуемого вещества. Полиэтилен ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ) был выбран, поскольку он не вносит существенных искажений в измеряемые спектры, так как единственной реакцией, приводящей к излучению  $\gamma$ -квантов, является  $^{12}\text{C}(n,n')$  с возбуждением уровня 4.4 МэВ ( $2^+$ ), которое распадается посредством  $\gamma$ -перехода в основное состояние. Захват быстрых нейтронов ядрами водорода

маловероятен. Некоторые образцы могут быть изготовлены непосредственно в виде блоков указанных размеров. Параметры образцов и характеристики измерений с ними приведены в табл. 1.

### 3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Во всех экспериментах обработка данных происходит как в онлайн, так и офлайн-режимах. Для сбора данных используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), разработанный в ОИЯИ на основе ПЛИС ARTIX-7 и АЦП AD9656 (16 bit, 125MSPS), подключаемый к персональному компьютеру (ПК) с помощью интерфейса USB 3.0. Обработка импульсов в режиме онлайн и их группировка в совпадения (события) производится АЦП. При этом на ПК передаются данные о площади, времени прихода и ширине каждого зарегистрированного импульса. При загрузке менее  $2 \times 10^4$  импульсов-в-секунду/канал возможна передача осциллограмм импульсов на ПК для последующей обработки в режиме офлайн. Полученные данные сохраняются в файлы для дальнейшего анализа амплитудных и энергетических распределений. Далее для примера рассмотрен анализ данных, полученных с образцами углерода и оксида кремния.

#### 3.1. Выделение спектра совпадений

Обработка данных от германиевых детекторов начинается с выбора окон на двумерных диаграммах энергия – время регистрации, соответствующих реакциям в образце (рис. 4). Окно соответствует совпадениям сигналов с  $\alpha$ - и HPGe-детекторов с учетом времени пролета нейтронов от генератора до образца.

На рис. 5 показан временной спектр событий с HPGe-детектора, который состоит из одного пика на плоской подложке. Подложка, называемая в дальнейшем «подложкой случайных совпадений», формируется  $\gamma$ -квантами из реакций немеченых нейтронов с конструкционными элементами установки и ее окружения. События, связанные с реакциями в образце, формируют пик, положение и дисперсия которого зависят от энергии  $\gamma$ -квантов.

Амплитуда и дисперсия пика совпадений в каждом из временных окон определяется как эффективность детектора, так и рассеянием  $\gamma$ -квантов окружением образца, что приводит к увеличению количества  $\gamma$ -квантов низких энергий. Зависимость ширины на половине высоты пика совпадений от энергии показана на рис. 6.

При обработке в качестве событий в образце выбираются сигналы совпадений на диаграммах энергия–время регистрации (рис. 4) в пределах окна шириной  $6\sigma$  ( $\pm 3\sigma$  от центроида), называемые в дальнейшем «совпадения». Из спектра «совпадений» вычитается подложка случайных совпадений,

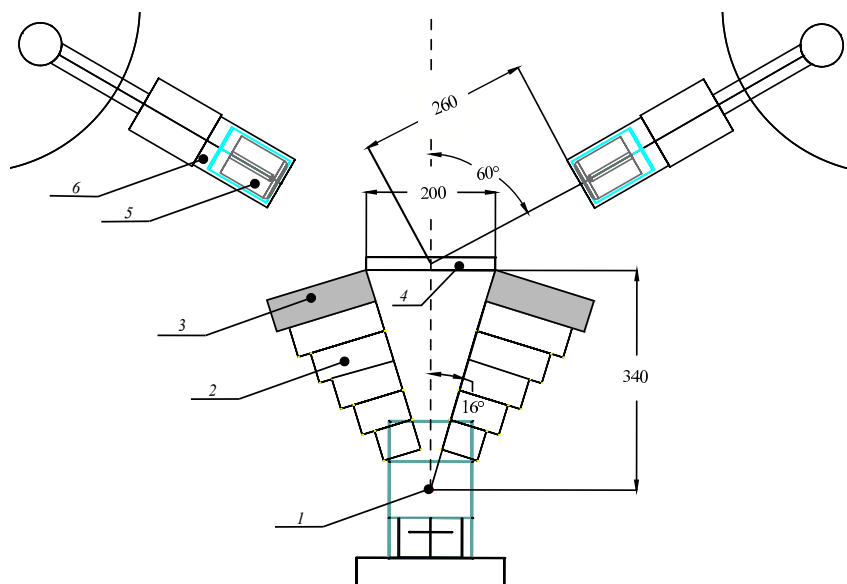


Рис. 3. Схема модифицированной установки на основе HPGe-детекторов. 1 — ИНГ-27, 2 — железные части коллиматора, 3 — свинцовые части коллиматора, 4 — образец, 5 — кристалл HPGe, 6 — корпус детектора. Все размеры указаны в мм

Таблица 1. Параметры используемых образцов и характеристики проводимых измерений

Образец	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Тип, размеры, см <sup>3</sup>	Время измерений, ч	Поток меченых нейтронов, с <sup>-1</sup>
C(nat)	1.74	Блок 22 × 22 × 1.8	5	4.4 × 10 <sup>5</sup>
SiO <sub>2</sub> (nat)	1.63	Контейнер, 22 × 22 × 2	18	6.4 × 10 <sup>4</sup>

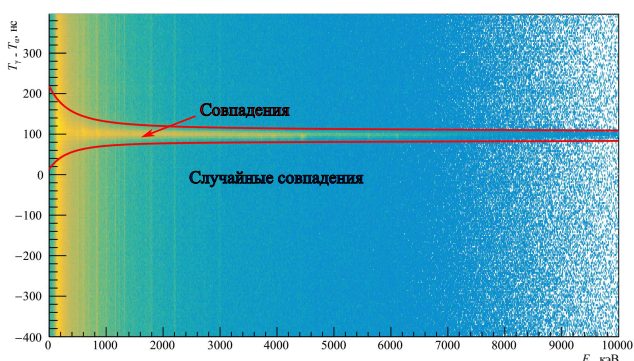


Рис. 4. Диаграмма энергия( $E_\gamma$ )–время между регистрацией  $\gamma$ -кванта и соответствующей ему  $\alpha$ -частицы ( $T_\gamma - T_\alpha$ ), образовавшихся в результате реакций в образце, с выделенным окном совпадений

и в результате получается распределение «чистых совпадений», содержащих только события, произошедшие в образце и его ближайшем окружении. Для чистых совпадений строятся энергетические спектры  $\gamma$ -квантов (см. рис. 7).

Вычитание подложки случайных совпадений приводит к значительному подавлению фоновых  $\gamma$ -пику. Это показано на рис. 7 и рис. 8, где применение описанной процедуры устраняет фоновый пик  $\gamma$ -квантов 1808.7 кэВ от реакции  $^{27}\text{Al}(n,d)$  в раме установки.

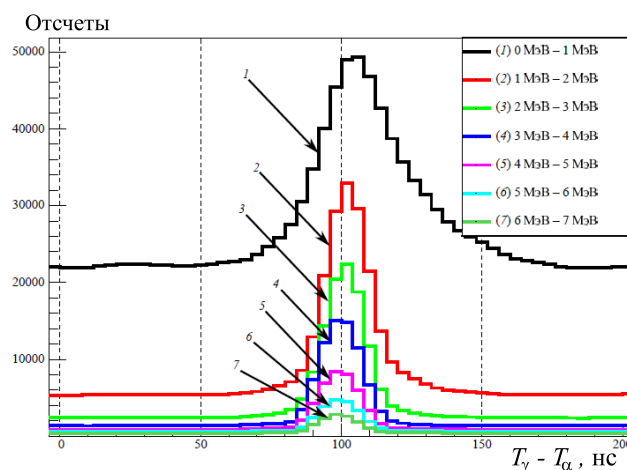


Рис. 5. Пример временных спектров для HPGe-детектора в различных энергетических окнах с шагом 1 МэВ. Гистограммы являются проекциями рис. 4 на ось Y

Применение метода меченых нейтронов существенно снижает количество фоновых событий в обрабатываемых спектрах. На рис. 9 показано сравнение спектра без совпадений со спектром во временном окне до и после вычитания спектра случайных совпадений для эксперимента на углеродной мишени. Количество событий в области вне  $\gamma$ -пику (100–3300 кэВ) подавлено в 67 раз.

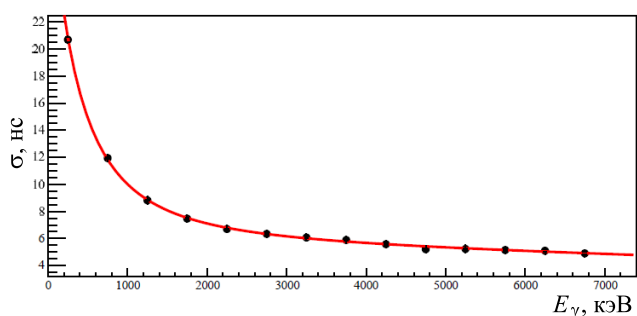


Рис. 6. Зависимость ширины на половине высоты пика совпадений от энергии частицы, зарегистрированной в HPGe-детекторе

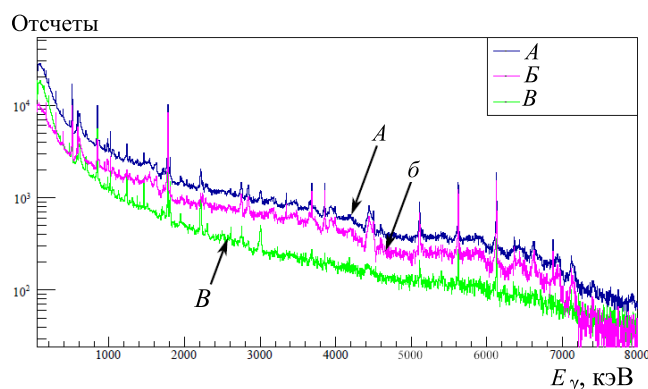


Рис. 7. Спектр чистых совпадений (Б) в сравнении со спектром в окне совпадений (А) и спектром событий вне окна (В) для образца  $\text{SiO}_2$ . Все спектры отнормированы на ширину временного окна

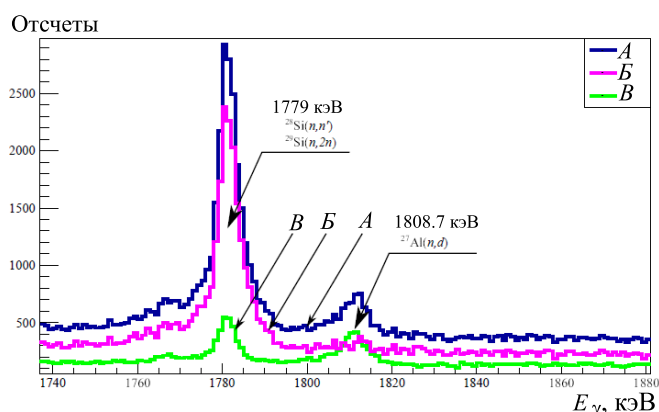


Рис. 8. Пример удаления фонового пика путем вычитания спектра случайных совпадений. А — спектр в окне совпадений, Б — спектр чистых совпадений, В — спектр событий вне окна совпадений

### 3.2. Эффективность детекторов

Для расчета сечений, определяемых по площадям фотопиков, необходимо учесть эффективность детектора, поглощение  $\gamma$ -квантов веществом образца и покрытие образца нейтронным пучком. Поскольку область излучения  $\gamma$ -квантов имеет конеч-

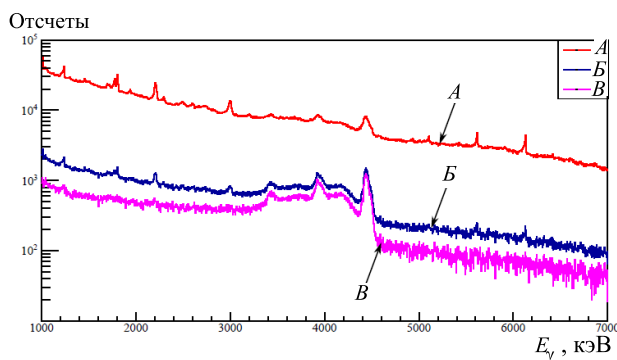


Рис. 9. Сравнение спектра «без совпадений» (А) со спектрами совпадений во окне пика совпадений на углеродной мишени до (Б) и после (В) вычитания спектра случайных совпадений

ные размеры, экспериментальное определение полной эффективности детекторной системы представляется затруднительным. Расчетное распределение реакций (центроидов меченых нейтронных пучков) по образцу для всех нейтронных пучков показано на рис. 10.

Для учета конечных размеров области излучения  $\gamma$ -квантов была проведена коррекция процедуры оценки эффективности  $\gamma$ -детектора. Действительно, для точечного источника с номером  $i$  можно записать:

$$N_{i\gamma} = N_{i0} \varepsilon_i \kappa_i, \quad (2)$$

где  $N_{i\gamma}$  и  $N_{i0}$  — количество зарегистрированных и испущенных из точки  $i$   $\gamma$ -квантов соответственно,  $\varepsilon_i$  — полная эффективность детектора для  $\gamma$ -квантов, испускаемых из точки  $i$ ,  $\kappa_i$  — коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов в образце. Для протяженной области, состоящей из большого количества точек, формула (2) преобразуется к виду:

$$N_\gamma = N_0 \sum_i \varepsilon_i \kappa_i p_i, \quad (3)$$

где  $N_\gamma$  — количество зарегистрированных  $\gamma$ -квантов,  $N_0$  — количество испущенных  $\gamma$ -квантов,  $p_i$  — вероятность реакции в точке  $i$ . Эффективным способом учета неточности области излучения  $\gamma$ -квантов, а также их поглощения в веществе образца и эффективности детектора является моделирование всех этих процессов методом Монте-Карло. В этом случае возможно непосредственное определение эффективности детектора  $\epsilon$  как отношения числа зарегистрированных  $\gamma$ -квантов к числу испущенных:

$$\epsilon = \frac{N_\gamma}{N_0} = \sum_i \varepsilon_i \kappa_i p_i.$$

Расчеты величин  $\epsilon$  для каждой комбинации «меченый пучок–пиксель  $\alpha$ -детектора» были выполнены с помощью программного пакета GEANT4. Пример результатов расчета  $\epsilon$  в сравнении с величиной

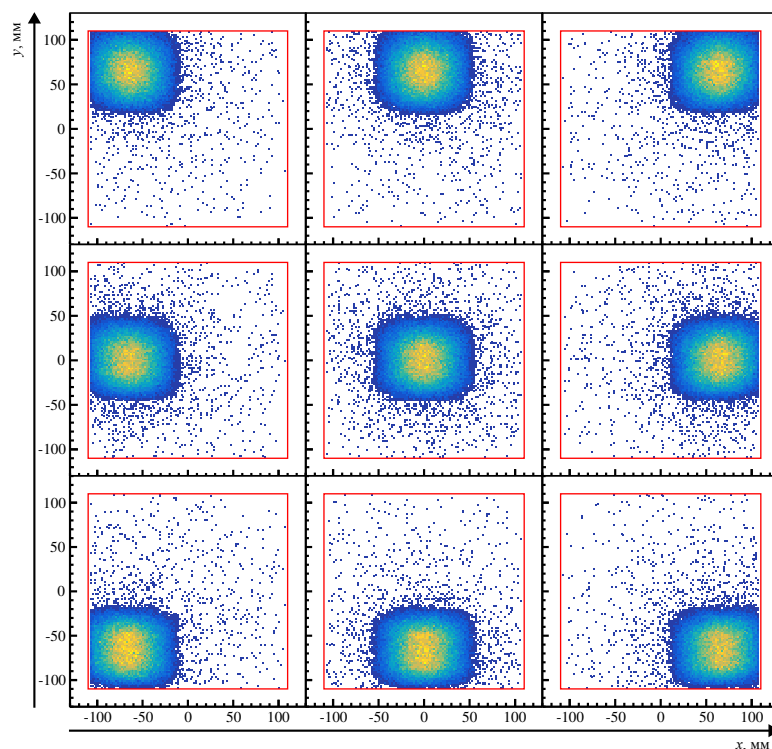


Рис. 10. Расчетное распределение точек взаимодействия меченых нейтронов с веществом образца. Границы образца показаны красными линиями. Координаты указаны в мм

Таблица 2. Результаты тестовых измерений сечений  $\gamma$ -излучения для  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  в сравнении с литературными данными [9]

$E_\gamma$ , кэВ	Реакция	$\sigma_\gamma$ , мб		
		TANGRA	Рекомендованные значения [9]	Диапазон экспериментальных значений [9]
1779.0 кэВ	$^{28}\text{Si}(n, n')^{28}\text{Si}$ , $^{29}\text{Si}(n, 2n')^{28}\text{Si}$	$350 \pm 20$	$403 \pm 20$	$293 \pm 28 \dots 488 \pm 70$
6129.9 кэВ	$^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}$	$113 \pm 10$	$148 \pm 10$	$84 \pm 17 \dots 179 \pm 22$
4438.9 кэВ	$^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}$	$175 \pm 6$	$187 \pm 5$	$121 \pm 8 \dots 440 \pm 80$

$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i p_i$  (без учета поглощения в образце) показан на рис. 11. Видно, что величина самопоглощения для использованного образца невелика. Данный факт минимизирует возможную систематическую ошибку обработки данных, возникающую из-за потенциально некорректных данных о сечениях ядерных реакций и предположениях о форме меченых пучков, используемых при моделировании.

Сечения образования  $\gamma$ -квантов вычисляются по формуле:

$$\sigma = \frac{N_\gamma \cdot M}{N_\alpha \chi_\alpha \rho_\alpha N_A d \epsilon \tau}, \quad (4)$$

где  $N_\alpha$  — число срабатываний  $\alpha$ -детектора,  $\chi_\alpha$  — коэффициент покрытия мишени нейтронным пучком, необходимый для пересчета  $N_\alpha$  в количество попавших на мишень нейтронов,  $\rho$  — плотность образца,  $d$  — средний путь, проходимый нейтронами в мишени,  $M$  — молярная масса вещества. Вели-

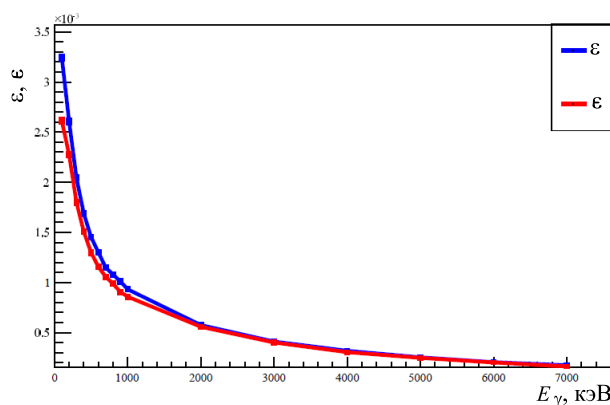


Рис. 11. Эффективность детектора  $\gamma$ -квантов с учетом ( $\epsilon$ ) и без учета ( $\epsilon$ ) поглощения  $\gamma$ -квантов в образце углерода

чины  $\chi_\alpha$  и  $d$  индивидуальны для каждого из нейтронных пучков и рассчитываются в ходе модели-

рования. Коэффициент  $\tau$  учитывает мертвое время детектора. Для определения мертвого времени германиевых детекторов была выполнена серия измерений с калибровочными  $\gamma$ -источниками и одновременным включением нейтронного генератора. Учитывающий мертвое время коэффициент  $\tau$  определялся как

$$\tau(I) = \frac{C(I)}{C_0},$$

где  $C(I)$  — скорость счета в  $\gamma$ -пике от источника на интенсивности генератора  $I$ , а  $C_0$  соответствует скорости счета с выключенным генератором.

Для проверки работоспособности собранной установки нами были выполнены эксперименты по измерению сечений излучения  $\gamma$ -квантов в наиболее интенсивных переходах в  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$ . Результаты приведены в табл. 2. Полученные нами значения сравнивались с доступными экспериментальными данными, взятыми из [9]. В этой компиляции приводятся результаты различных измерений, сделанных при энергиях нейтронов, близких к 14 МэВ. На основе анализа их распределений оцениваются т.н. рекомендованные значения сечений.

Полученные нами результаты близки к величинам, рекомендованным в [9], и лежат внутри диапазонов представленных там экспериментальных данных. В полноценных измерениях ожидается улучшение примерно в 3 раза.

Нами создана и испытана установка для измерения сечений образования  $\gamma$ -квантов в реакциях  $(n, X\gamma)$ , где  $X \rightarrow n, p, d, \alpha$ , вызываемых нейтронами с энергией 14.1 МэВ. Особенностью установки является применение портативного генератора ИНГ-27 с возможностью использования метода меченых нейтронов, позволяющего эффективно разделять фоновые и полезные события. Для повышения эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов различных энергий использовались два  $\gamma$ -спектрометра HPGe большого объема и с высоким энергетическим разрешением. Для минимизации радиационных повреждений  $\gamma$ -детекторов и уменьшения их загрузки фоновыми  $\gamma$ -квантами разработана теньевая двухслойная защита. Создана методика обработки экспериментальных данных, позволяющая эффективно выделять события, связанные с реакциями в образце. В ходе тестовых измерений получены сечения наиболее интенсивных  $\gamma$ -переходов в ядрах  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$ . Созданная установка будет использована для систематических измерений сечений излучения  $\gamma$ -квантов в нейтрон-ядерных реакциях на ряде элементов с целью создания специализированной базы нейтрон-ядерных данных для нейтронов с энергией 14.1 МэВ, полезной для прикладных и фундаментальных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-12-00239).

- [1] *Grieken R., Speecke A., Hoste J.* // *Journal of Radioanalytical Chemistry.* **6**, N 2. 385. (1970).
- [2] *Е.А. Разинков, В.Ю. Алексахин, Ю.Н. Рогов, М.Г. Сапожников* // *Горный журнал.* № 2. 51. (2022). <https://drive.google.com/file/d/131EdsbaiFwtUEN0y09chIuEAptw0Ymfu/view>
- [3] *Valkovic V.* *14 MeV Neutrons: Physics and Applications.* CRC Press, 2015. [https://homel.vsb.cz/~ale02/Physics/neutrons\\_14MeV\\_physics\\_applications\\_valkovic.pdf](https://homel.vsb.cz/~ale02/Physics/neutrons_14MeV_physics_applications_valkovic.pdf)
- [4] *Yakubova G., Kavetskiy A., Prior S.A., Torbert H.A.* // *Applied Radiation and Isotopes.* **150.** 127 (2019).
- [5] *Алексахин В.Ю., Разинков Е.А., Рогов Ю.Н., Садовский А.Б.* и др. // *Письма в ЭЧАЯ.* **19**, № 6(245). 546. (2022). [http://www1.jinr.ru/Pepan\\_letters/panl\\_2022\\_6/10\\_aleksah.pdf](http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2022_6/10_aleksah.pdf)  
*Alexakhin V.Y., Razinkov E.A., Rogov Yu.N.* et al. // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* **19**, N 6. 717. (2022).
- [6] *Locatelli G., Mancini M., Todeschini N.* // *Energy Policy.* **61.** 1503. (2013).
- [7] *Altstadt E., Beckert C., Freiesleben H.* et al. // *Ann. Nucl. Energy.* **34.** 36. (2007).
- [8] *Ene D., Borcea C., Kopecky S.* et al. // *NIM A.* **618.** 54. (2010).
- [9] *Simakov S. P., Pavlik A., Vonach H.* et al. *Status of Experimental and Evaluated Discrete Gamma-Ray Production at En=14.5 MeV.* International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria. 1998. <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-ccp-0413/>
- [10] Проект TANGRA, <https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/ustanovki/tangra-project-ru>
- [11] *Боголюбов Е.П., Коротков С.А., Краснов С.А.* и др. *Нейтронные технологии на базе портативных генераторов нейтронов для инспекции опасных объектов / Труды Международной научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе».* М.: ВНИИА им. Духова, 2005. С. 326.
- [12] *Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Кадышевский В.Г.* и др. *Изучение ядерно-физических методов идентификации скрытых веществ в ОИЯИ / Труды Международной научно-технической конференции «Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе».* М.: ВНИИА им. Духова, 2005. С. 306.
- [13] *Ruskov I.N., Kopatch Yu.N., Bystritsky V.M.* et al. // *Phys. Proc.* **64.** 163. (2015).
- [14] *Быстрицкий В.М., Валкович В., Грозданов Д.Н.* и др. // *Письма в ЭЧАЯ.* **12**, № 2(193). 486. (2015). (*Bystritsky V.M., Valkovich V., Grozdanov D.N.* et al. // *Phys. Part. Nuclei Lett.* **12**, 325. (2015).)
- [15] *Быстрицкий В.М., Грозданов Д.Н., Зонтиков А.О.* и др. // *Письма в ЭЧАЯ.* **13**, № 4(202). 793. (2016). (*Bystritsky V. M., Grozdanov D. N., Zontikov A. O.* et al. // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* **13**, N 4. 504 (2016).)
- [16] *Грозданов Д.Н., Федоров Н.А., Быстрицкий В.М.* и др. // *Ядерная физика.* **81**, № 5. 548. (2018).  
*Grozdanov D. N., Fedorov N. A., Bystritski V. M.* et



- al. // *Physics of Atomic Nuclei*. **81**, N 5. 588. (2018).
- [17] Федоров Н. А., Третьякова Т. Ю., Грозданов Д. Н. и др. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. **2**. 1820205. (2018).
- [18] Fedorov N. A., Grozdanov D. N., Kopatch Yu. N. // *European Physical Journal A*. **57**, N 6. 194. (2021).
- [19] Grozdanov D., Fedorov N., Dabylova S. et al. // *Chinese Phys C. accepted manuscript*, (2023).
- [20] Быстрицкий В.М., Валкович В., Грозданов Д.Н. и др. // Письма в ЭЧАЯ. **12**, № 2(193). 486. (2015).  
Bystritsky V.M., Valkovic V., Grozdanov D.N. et al. // *Phys. Part. Nuclei Lett.* **12**. 325. (2015).
- [21] ORTEC GMX Series Coaxial HPGe Detector Product Configuration Guide, <https://www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/brochures/g/gamma-x-a4.pdf?la=en&revision=420cd7bb-9d75-485c-80a2-acaaccdf8197>

## New Version of the Experimental Setup for the Measurement of $\gamma$ -Quantum Emission Cross Sections in Nuclear Reactions Induced by 14.1 MeV Neutrons

Yu.N. Kopatch<sup>1</sup>, D.N. Grozdanov<sup>1,2</sup>, N.A. Fedorov<sup>1,3</sup>, T.Yu. Tretyakova<sup>1,3,4</sup>, P.I. Kharlamov<sup>1,4,a</sup>, A.V. Andreev<sup>1,3</sup>, G. Ahmadov<sup>1,5</sup>, D. Berikov<sup>1,6</sup>, S.B. Dabylova<sup>1,6</sup>, Pr.K. Das<sup>1,7</sup>, A. Kumar<sup>8</sup>, G.V. Pampushik<sup>3</sup>, I.N. Ruskov<sup>1,2</sup>, I.A. Sirakov<sup>2</sup>, V.R. Skoy<sup>1</sup>, P.G. Filonchik<sup>1,9</sup>, C. Hramco<sup>1,10</sup>, and TANGRA collaboration

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, Moscow Region, 141980, Russia,

<sup>2</sup>Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences. Sofia, 1784 Bulgaria

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics. Moscow 119991, Russia

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU). Moscow 119991, Russia

<sup>5</sup>Innovation and Digital Development Agency Nuclear Research Department. Baku, AZ0100 Azerbaijan

<sup>6</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University. Astana, 010008, Republic of Kazakhstan

<sup>7</sup>Pabna University of Science and Technology, Department of Physics. Pabna-6600, Bangladesh

<sup>8</sup>Banaras Hindu University, Institute of Science, Department of Physics. Varanasi, 221005, India

<sup>9</sup>Moscow Institute of Physics and Technology. Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

<sup>10</sup>Institute of Chemistry of Moldova Academy of Science. Chisinau, MD-2028, Republic of Moldova

E-mail: <sup>a</sup>[pi.kharlamov@physics.msu.ru](mailto:pi.kharlamov@physics.msu.ru)

Within the TANGRA project framework, a new experimental setup has been constructed for the measurement of reaction cross sections ( $n, X, \gamma$ ) in the interaction of 14.1 MeV neutrons with nuclei. The facility has a special feature: the use of the tagged neutron method. This method enables efficient separation of background and useful events, as well as accurate tracking of neutron flux. Test measurements were performed on <sup>28</sup>Si, <sup>12</sup>C, and <sup>16</sup>O nuclei, and the results showed satisfactory agreement with available experimental data. This paper presents the features of the setup design and the methodology for processing the obtained experimental data.

PACS: 29.30.Kv, 29.40.Wk, 25.40.Fq.

*Keywords:* tagged neutron method, neutron-nuclear reactions, neutron scattering, gamma-spectrometry, HPGe detector.

*Received 28 December 2023.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 3. Pp. .

### Сведения об авторах

1. Копач Юрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора лаборатории нейтронной физики по научной работе; тел.: (496) 216-24-59, e-mail: [kopatch@nf.jinr.ru](mailto:kopatch@nf.jinr.ru).
2. Грозданов Димитър Николов — канд. физ.-мат. наук, нач. группы.
3. Федоров Никита Александрович — канд. физ.-мат. наук, нач. сектора, науч. сотрудник.
4. Третьякова Татьяна Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [tretyakova@sinp.msu.ru](mailto:tretyakova@sinp.msu.ru).
5. Харламов Петр Ильич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (496) 216-27-85, e-mail: [pi.kharlamov@physics.msu.ru](mailto:pi.kharlamov@physics.msu.ru).
6. Андреев Александр Владимирович — лаборант, студент.
7. Ахмедов Гадир Саттар Оглы — канд. физ.-мат. наук, нач. группы.
8. Бериков Данияр — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.
9. Дабылова Салтанат — инженер.
10. Дас Претам Кумар — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник.
11. Кумар Аджай — канд. физ.-мат. наук, доцент.
12. Пампушик Григорий Владимирович — студент.
13. Русков Иван Николов — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: [ivan@inrne.bas.bg](mailto:ivan@inrne.bas.bg).
14. Сираков Иван Апостолов — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: [sirakov@inrne.bas.bg](mailto:sirakov@inrne.bas.bg).
15. Ской Вадим Рудольфович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник.
16. Филончик Полина Геннадьевна — лаборант, студент.
17. Храмко Константин — науч. сотрудник.