

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МГНОВЕННЫХ ГАММА-КВАНТОВ В РЕАКЦИЯХ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ЖЕЛЕЗА

*В. В. Гаганов*<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр —  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
Саров, 607188, Россия

Для тестирования оцененных ядерных данных выполнены измерения дифференциального сечения образования мгновенных  $\gamma$ -квантов в неупругих взаимодействиях 14,5-МэВ нейтронов с ядрами железа. Измерения проведены в редакции интегральных экспериментов методом времени пролета на нейтронном генераторе НГ-150М, работающем в импульсном режиме, с использованием однокристалльного гамма-спектрометра со сцинтиллятором NaI(Tl) диаметром 15 см и высотой 10 см. Новые данные удовлетворительно согласуются с результатами аналогичных экспериментов. Выполнено сравнение оцененных сечений из библиотек ENDF/B-V, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII.0 с результатами эксперимента.

To test the evaluated nuclear data, the differential cross section for prompt gamma-ray production in inelastic interactions of 14.5 MeV neutrons with iron nuclei was measured. The measurements were carried out in the edition of integral experiments by the time-of-flight method on the NG-150M neutron generator operating in the pulsed mode, using a single-crystal gamma-spectrometer with a NaI(Tl) scintillator 15 cm in diameter and 10 cm in height. The estimated cross sections from the ENDF/B-V, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.1, ENDF/B-VIII.0 libraries were compared with the experimental results.

PACS: 25.40.Fq; 29.30.Kv

## ВВЕДЕНИЕ

Потребность в надежных данных по гамма-образованию под действием быстрых нейтронов связана с задачами оптимизации защиты ядерных энергетических установок нового поколения. В настоящее время накоплен большой объем экспериментальных данных по сечениям гамма-образования. На их основе сформированы соответствующие оценки в библио-

---

\* E-mail: gavaler@rambler.ru

теках ядерных данных. Однако имеющиеся экспериментальные и оцененные данные не всегда согласуются между собой [1]. В этой связи для тестирования и наполнения библиотек оцененных ядерных данных во ВНИИЭФ была проведена серия интегральных экспериментов на генераторе ДТ-нейтронов с образцами из основных конструкционных материалов [2, 3]. Измерения проводились методом времени пролета с использованием импульсного режима работы нейтронного генератора и элементов измерительного комплекса, разработанного в ходе предшествующих экспериментов [4, 5].

## 1. ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Нейтронный генератор и гамма-детектор со скintиллятором NaI(Tl) располагались в соседних залах, разделенных бетонной стеной толщиной 300 см (рис. 1). Каналом вывода излучения служила проложенная в стене стальная труба с внутренним диаметром 30 см. На входе трубы размещался стальной коллиматор с изменяемым внутренним диаметром, подбиравшимся в зависимости от размера исследуемого образца таким образом, чтобы в поле зрения детектора попадал минимально возможный объем воздуха вокруг них. Детектор располагался на расстоянии 910 см от плоскости нейтрон-образующей мишени и окружался свинцовой защитой с конусным коллиматором, ограничивающим входное окно детектора диаметром 9,9 см. Выбранное расстояние обеспечивало надежное разделение моментов прихода на детектор  $\gamma$ -квантов и ДТ-нейтронов.

В качестве источника ДТ-нейтронов использовался генератор НГ-150М [4]. Получение ДТ-нейтронов осуществлялось в результате

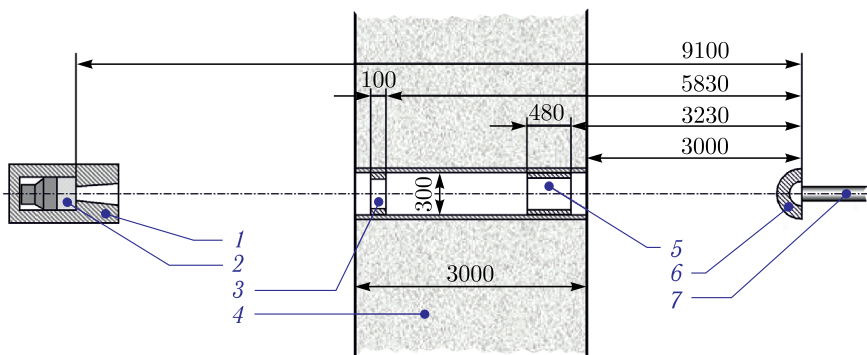


Рис. 1. Геометрия измерений: 1 — свинцовая защита детектора; 2 — скintилляционный гамма-детектор; 3 — свинцовый коллиматор с внутренним диаметром 235 мм; 4 — бетонная стена; 5 — стальная труба с внутренним диаметром 250 мм; 6 — исследуемый полусферический образец; 7 — мишенное устройство нейтронного генератора НГ-150М. Размеры указаны в мм

бомбардировки нейтрон-образующей мишени пучком атомарных дейтронов с энергией 130 кэВ. Установленный на генераторе магнитный сепаратор обеспечивал отсечение молекулярной составляющей дейтронного пучка. Нейтрон-образующая мишень, в виде титан-третиевой пленки толщиной 4 мкм, была нанесена на молибденовую подложку толщиной 0,1 см.

Средний поток DT-нейтронов составлял  $10^8 \text{ с}^{-1}$ . Измерение потока DT-нейтронов осуществлялось (расположенными в трубе дрейфа дейтронов) альфа-мониторами на основе кристаллов CsI(Tl) толщиной 0,12 мм с диаметром диафрагмы 0,5 мм. Ими регистрировались  $\alpha$ -частицы, сопутствующие DT-реакции. Связь между потоком DT-нейтронов и показаниями альфа-мониторов была определена в градуировочном эксперименте с нейтронным детектором типа протонного телескопа [6]. Результирующая погрешность измерения потока DT-нейтронов не превышала 2,5% (здесь и далее погрешности даны для доверительной вероятности 0,95). Энергетические спектры DT-нейтронов и анизотропия их выхода рассчитывались с помощью программы SRIANG [7]. Средняя энергия DT-нейтронов, вылетающих из мишени в телесный угол  $2\pi$  ср (ограниченный полусферическим образом), составила 14,5 МэВ.

Гамма-кванты, образованные под действием DT-нейтронов в материалах, окружающих мишень, могли давать значимый вклад в регистрируемый спектр. Для снижения этого вклада было разработано тонкостенное мишенное устройство малого диаметра (рис. 2). Для последующего учета при обработке результатов спектр  $\gamma$ -квантов, образованных непосредственно в мишенном устройстве НГ-150М, был измерен в ходе отдельного эксперимента без образца.

Для разделения  $\gamma$ -квантов и DT-нейтронов по времени пролета генератор НГ-150М функционировал в импульсном режиме, который обес-

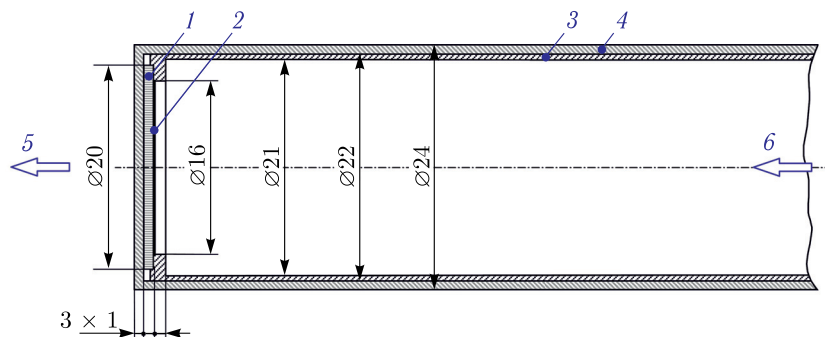


Рис. 2. Мишенное устройство нейтронного генератора: 1 — подложка мишени; 2 — нейтрон-образующая мишень с тритиевым насыщением; 3 — трубка прижимная; 4 — корпус мишенного устройства; 5 — DT-нейтроны; 6 — направление потока дейтронов. Размеры указаны в мм

печивался периодическим смещением дейтронного пучка от оси ускорительной системы генератора. Импульсы ДТ-нейтронов имели колоколообразную временную структуру с длительностью на полувысоте 30 нс и следовали с частотой 0,5 МГц.

Для учета фоновых условий была использована технология измерений в двух временных окнах, отработанная в ходе предыдущих экспериментов [4, 5]. Анализ амплитуд импульсов с гамма-детектора проводился лишь в двух интервалах времени шириной по 125 нс. Середина первого интервала (рабочее окно) совмещалась с моментом прихода на детектор  $\gamma$ -квантов из образца. Второе временное окно (фоновое) привязывалось к моменту времени, когда все вышедшие из образца нейтроны уже пролетели расстояние до детектора, а образовавшиеся от следующей нейтронной вспышки  $\gamma$ -кванты на него еще не пришли. Искомое распределение амплитуд импульсов выражалось в виде разности распределений, зарегистрированных в рабочем и фоновом временных окнах.

Исследуемые образцы имели вид полусферического слоя. Они размещались так, что ось симметрии мишенного устройства проходила через центр полусферы, а плоскость среза полусферы совпадала с плоскостью мишени (см. рис. 1). Образец из железа имел следующие параметры: внутренний радиус 10,0 см, внешний радиус 11,9 см, масса 11024 г; содержание основного элемента Fe (естественного изотопного состава) — 98%; содержание примесей (в атомных долях): С — 1%; Mn — 1%.

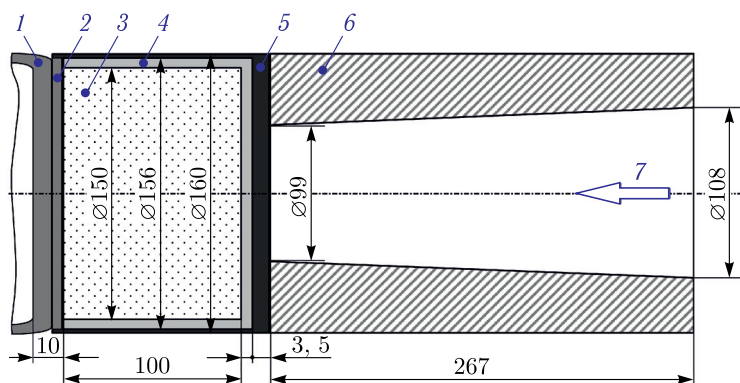


Рис. 3. Геометрия сцинтиляционного гамма-детектора: 1 — стеклянная колба ФЭУ; 2 — стеклянное выходное окно; 3 — сцинтиллятор NaI(Tl); 4 — порошковый отражатель (MgO); 5 — алюминиевый контейнер сцинтиллятора; 6 — конический свинцовый коллиматор; 7 — направление прилета регистрируемых  $\gamma$ -квантов. Свинцовая защита по бокам детектора не показана. Размеры указаны в мм

## 2. ОПИСАНИЕ ГАММА-ДЕТЕКТОРА

Конструкция гамма-детектора, использованного в описываемых экспериментах, представлена на рис.3. Детектор, состоящий из фотоумножителя ФЭУ-49Б и кристалла NaI(Tl) с диаметром 15 см и высотой 10 см, был помещен в массивную свинцовую защиту с толщиной стенок не менее 10 см (поз.1 на рис. 1). Перед кристаллом NaI(Tl) был установлен конический коллиматор; таким образом, регистрируемые  $\gamma$ -кванты облучали только приосевую часть сцинтиллятора. Для учета особенностей используемого детектора были выполнены градуировочные эксперименты с эталонными  $\gamma$ -источниками  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{228}\text{Th}$  из набора ОСГИ, а также дополнительный эксперимент с облучением графитового образца DT-нейтронами. В ходе этих экспериментов была получена форма линии для нескольких энергий  $\gamma$ -квантов: 0,662; 1,333; 2,615; 4,439 МэВ. По результатам анализа формы и положения пика полного поглощения были определены энергетическая зависимость разрешения детектора и масштаб шкалы амплитуд импульсов. На основе этих данных с помощью программы С-007 [8] был выполнен расчет функции отклика детектора для  $\gamma$ -квантов с энергиями до 14 МэВ с шагом 0,25 МэВ (рис. 4).

Помимо измерения энергетического разрешения, по результатам экспериментов с каждым из  $\gamma$ -источников были определены значения счетной эффективности детектора. Различия между расчетными и экспери-

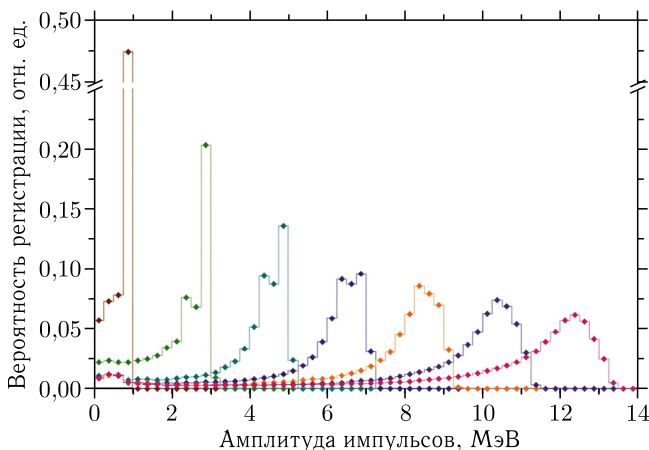


Рис. 4. Элементы функции отклика гамма-детектора. Показана форма линии для нескольких значений энергии  $\gamma$ -квантов: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 МэВ. Матрица функции отклика для  $\gamma$ -квантов с энергиями до 14 МэВ с шагом 0,25 МэВ рассчитана методом Монте-Карло с использованием оценок энергетической зависимости разрешения детектора, полученных в градуировочных экспериментах с эталонными  $\gamma$ -источниками

ментальными значениями счетной эффективности позволили заключить, что систематическая ошибка (при расчете функции отклика) в оценке соотношения между пиком полного поглощения и комптоновским континуумом не превышает 6%.

### 3. ПЕРВИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Первичные результаты измерений в виде распределения амплитуд импульсов, зарегистрированных в эксперименте с образцом из железа, представлены на рис. 5. Искомое распределение амплитуд импульсов определялось в виде разности распределений, зарегистрированных в двух временных окнах. Из полученного распределения, сгруппированного на равномерной энергетической сетке с шагом 250 кэВ, был восстановлен спектр  $\gamma$ -квантов, выходящих из исследуемого образца в направлении входного окна детектора. Восстановление выполнялось методом Тараско [9] с использованием рассчитанной функции отклика детектора (см. рис. 4). Результат восстановления показан на рис. 6.

Относительная погрешность измерения спектра  $\gamma$ -квантов определялась геометрической суммой трех составляющих:

а) методическая погрешность, не зависящая от формы регистрируемого распределения  $\gamma$ -квантов и практически для всех его частей равная 8%. Эта составляющая определялась следующими слагаемыми: погрешность измерения потока ДТ-нейтронов (2,5%); погрешность

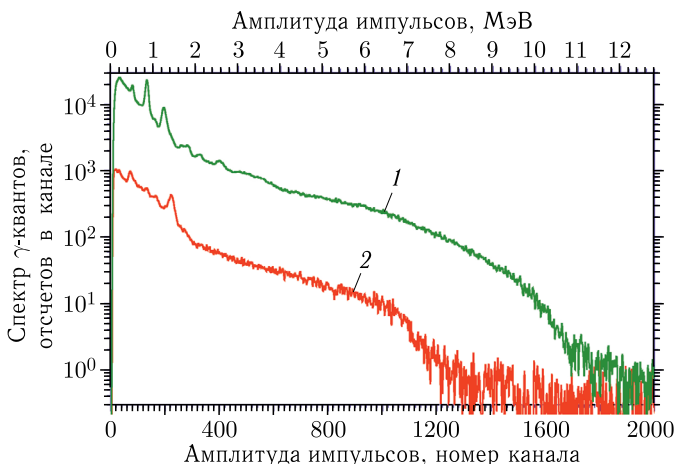


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Результаты измерений в двух временных окнах. Показаны распределения амплитуд импульсов, зарегистрированных в рабочем (эффект плюс фон) и фоновом временных окнах. Верхнее распределение (зеленая кривая, 1) — результат измерений в рабочем временном окне, характеризует спектр  $\gamma$ -квантов из образца. Нижнее распределение (красная кривая, 2), характеризует спектр случайных совпадений

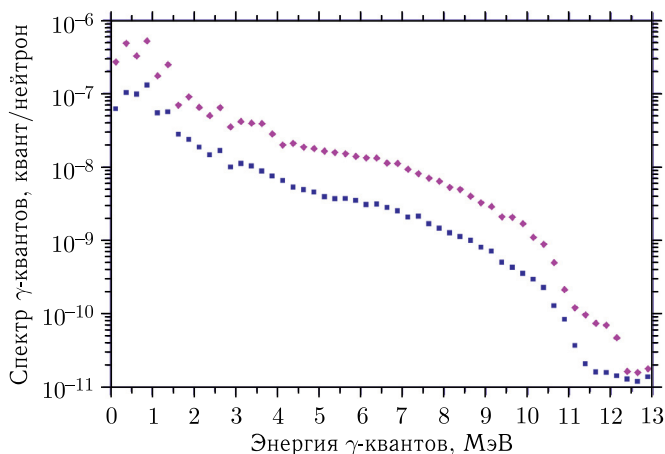


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Восстановленный спектр  $\gamma$ -квантов. Фиолетовыми ромбами (верхняя точечная кривая) показан спектр, восстановленный из разности рабочего и фонового распределений амплитуд импульсов. Спектр представляет собой суммарное распределение  $\gamma$ -квантов, вылетевших из образца и из мишенного устройства. Спектр  $\gamma$ -квантов из мишенного устройства (синие квадраты, нижняя точечная кривая) измерен в эксперименте без образца

расчетной оценки счетной эффективности детектора (4 %); погрешность определения ширины пика полного поглощения (2 %); погрешность (6 %), обусловленная неточностью воспроизведения соотношения между пиком полного поглощения и комптоновским континуумом в расчетной функции отклика;

б) статистическая погрешность измерений (не превышала 3%). Использование геометрии интегральных экспериментов обеспечило получение результатов с необходимой статистикой импульсов вплоть до верхней границы исследуемого диапазона энергий  $\gamma$ -квантов;

в) погрешность, вызванная неточностью градуировки шкалы амплитуд импульсов. Для ее оценки, полученный спектр был перегруппирован по интервалам со смещенными (на величину погрешности привязки шкалы 0,5 %) границами и определены дополнительные групповые выходы  $\gamma$ -квантов. В качестве меры составляющей погрешности, обусловленной неточностью шкалы, была принята разность исходного и перегруппированного спектров.

#### 4. ОЦЕНКА СЕЧЕНИЯ ГАММА-ОБРАЗОВАНИЯ

В описываемых экспериментах регистрировалось суммарное  $\gamma$ -излучение, вызываемое нейтронами как в образце, так и в мишенном устройстве НГ-150М (имелась еще одна составляющая спектра —  $\gamma$ -кванты,

образованные в элементах оснастки и в объеме воздуха, окружающем образец; однако ее вклад не превышал 1%). Для вычленения спектра  $\gamma$ -квантов, образованных непосредственно в образце, были проведены расчеты трансформации спектра  $\gamma$ -квантов из мишенного устройства (измеренного в отдельном эксперименте) при прохождении через образец. В результате этих расчетов был определен вклад мишенного устройства в регистрируемый спектр (см. рис. 6); для большей части спектра  $\gamma$ -квантов этот вклад составил менее 25%. Важно отметить, что интегральные эксперименты с образцом и эксперимент с мишенным устройством без образца проводились в идентичных условиях. Их первичные результаты проходили одинаковые процедуры обработки, включая восстановление спектра  $\gamma$ -квантов с использованием одной и той же матрицы функции отклика. Поэтому погрешности двух этих спектров имеют согласованный характер.

На следующем этапе обработки был определен вклад вторичных нейтронов. При неупругих взаимодействиях ДТ-нейтронов в исследуемых образцах рождаются вторичные нейтроны, которые, в свою очередь, могут образовать  $\gamma$ -кванты. Для учета их вклада были выполнены расчеты гамма-образования в образце от нейтронов, энергия которых в результате соударений опустилась ниже 11 МэВ. Для  $\gamma$ -квантов с энергиями ниже 4 МэВ величина поправки составила менее 15%, для  $\gamma$ -квантов с энергиями выше 4 МэВ величина поправки составила менее 5%.

Последним, и одним из наиболее важных в данной работе, явился этап учета вторичных  $\gamma$ -квантов. Задача здесь состояла в переходе от  $\gamma$ -квантов, вышедших из образца, к  $\gamma$ -квантам на момент их рождения. ДТ-нейтроны, образующиеся в мишени генератора, изначально имеют заметную анизотропию выхода. Кроме того, при прохождении через стенки мишенного устройства в разных направлениях они проходят в нем пути разной длины. Эти два фактора приводят к тому, что образование  $\gamma$ -квантов в разных частях полусферического образца происходит с достаточно сильно различающейся интенсивностью. Не менее важен учет различий в величинах ослабления потока  $\gamma$ -квантов, образующихся в разных частях образца, при их вылете в направлении детектора. Таким образом, переход от измеренного на поверхности детектора спектра  $\gamma$ -квантов к спектру на момент их рождения в исследуемом образце представляет собой обратную задачу. Вычисления этого этапа работы проявились на участке спектра  $\gamma$ -квантов с энергиями менее 1 МэВ.

Все описанные выше расчеты, а также оценка вероятности неупругого взаимодействия ДТ-нейтрона в образце были выполнены методом Монте-Карло по программе C-007 с использованием оцененных нейтронных сечений из библиотеки ENDF/B-V.

## 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты эксперимента представлены на рис. 7–10. Относительная погрешность сечения гамма-образования для  $\gamma$ -квантов с энергиями менее 2 МэВ составила 10–12%; от 2 до 9 МэВ — 9%; более 9 МэВ — 15–20% (конкретные значения указаны в предыдущей работе [2]).

Новые данные по сечению гамма-образования были сопоставлены с результатами других аналогичных экспериментов [10–13]. Как можно видеть по графикам (см. рис. 7, 8), сравниваемые результаты практически совпадают для  $\gamma$ -квантов с энергиями от 1 до 5 МэВ, что может рассматриваться как подтверждение корректности представленных измерений. Систематическое отклонение результатов эксперимента [13] иллюстрирует сложность постановки и обработки подобных измерений.

Полученные сечения обеспечили возможность анализа состояния оценок в одной из наиболее полных и регулярно обновляемых библиотек ядерных данных — ENDF (см. рис. 9, 10). Данные по железу в библиотеке ENDF/B-V удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента: в диапазоне энергий от 2 до 6 МэВ отклонения практически не выходят за пределы коридора ошибок эксперимента — остаются в пределах 15%. Переоценка констант для железа, выполненная в шестой версии библиотеки, значительно ухудшила ситуацию — отклонения приняли систематический характер. Сечения гамма-образования в ENDF/B-VII.1 воспроизводят данные предыдущей версии библиотеки. При формиро-

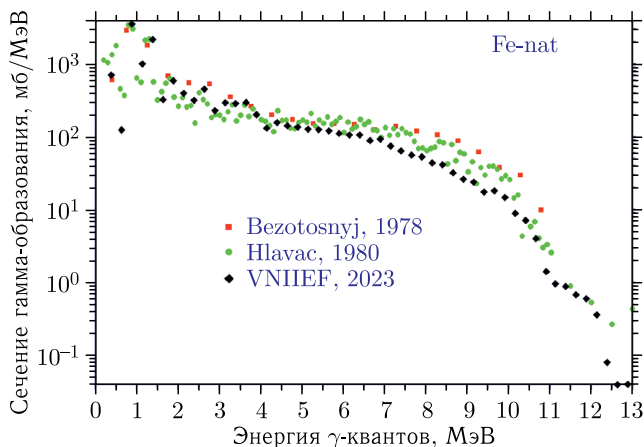


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Дифференциальное сечение гамма-образования на ядрах железа. Новые данные по сечению гамма-образования на ядрах железа показаны черными ромбами с меткой «VNIIEF, 2023»; красными квадратами с меткой «Bezotosnyj, 1978» показаны результаты эксперимента [10]; зелеными кружками с меткой «Hlavac, 1980» — результаты эксперимента [11] при энергии нейтронов 14,0 МэВ. Результаты практически совпадают для  $\gamma$ -квантов с энергиями от 1 до 5 МэВ при энергии нейтронов 14,6 МэВ

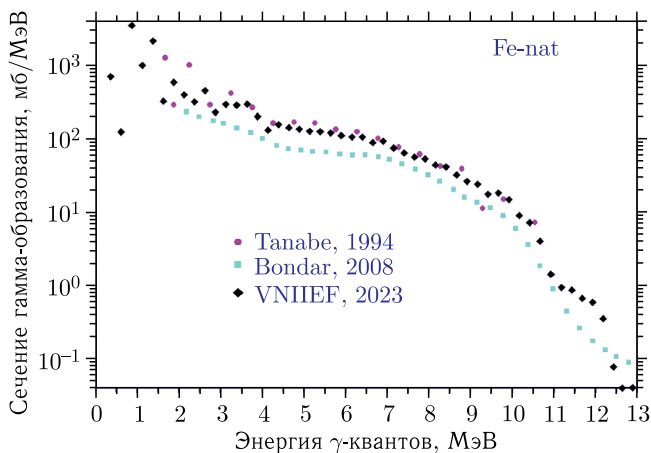


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Сравнение новых результатов с результатами аналогичных экспериментов. Новые данные по сечению гамма-образования на ядрах железа показаны черными ромбами с меткой «VNIIEF, 2023»; сиреневыми кружками с меткой «Tanabe, 1994» показаны результаты эксперимента [12] при энергии нейтронов 13,5 МэВ. Систематическое отклонение набора голубых квадратов с меткой «Bondar, 2008» (результаты эксперимента [13] при энергии нейтронов 14,1 МэВ) иллюстрирует сложность постановки и обработки подобных измерений

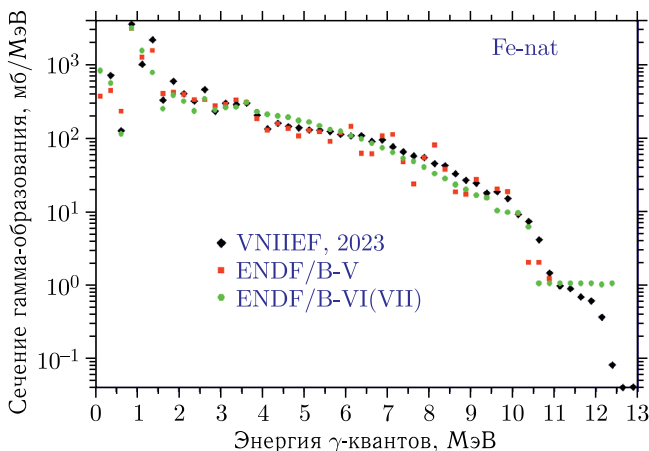


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Сравнение результатов эксперимента с сечениями из библиотек ENDF/B-V и VI. Новые данные по сечению гамма-образования на ядрах железа показаны черными ромбами с меткой «VNIIEF, 2023»; оцененные сечения из библиотеки ENDF/B-V показаны красными квадратами с соответствующей меткой; совпадающие сечения из библиотек ENDF/B-VI.8 и ENDF/B-VII.1 показаны одним набором зеленых кружков с меткой «ENDF/B-VI(VII)»

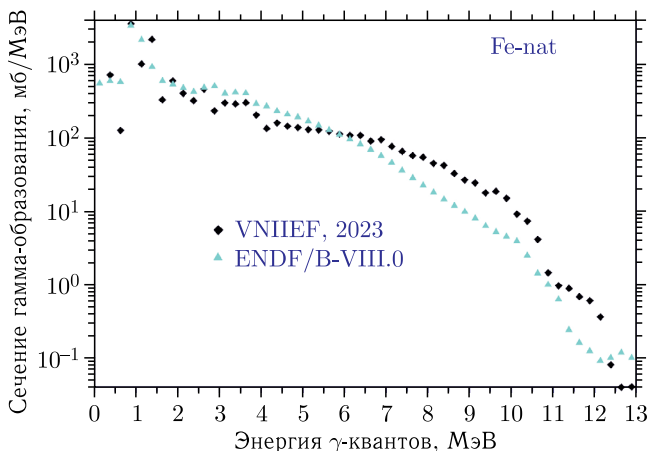


Рис. 10 (цветной в электронной версии). Сравнение результатов эксперимента с сечениями из библиотеки ENDF/B-VIII. Новые данные по сечению гамма-образования на ядрах железа показаны черными ромбами с меткой «VNIEF, 2023»; оцененные сечения из библиотеки ENDF/B-VIII.0 показаны голубыми треугольниками с соответствующей меткой. Заметно систематическое расхождение экспериментальных и библиотечных данных для  $\gamma$ -квантов с энергией выше 6 МэВ

вании данных по сечениям в библиотеке ENDF/BVIII.0 отклонение от экспериментальных данных существенно увеличилось (см. рис. 10). Результаты выполненного сравнения показывают, что переоценка констант при обновлении библиотек не гарантирует повышение достоверности оцененных данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В редакции интегральных экспериментов получены новые результаты по дифференциальному сечению образования мгновенных  $\gamma$ -квантов в реакциях нейтронов с энергией 14,5 МэВ на ядрах железа.

Новые данные удовлетворительно согласуются с результатами аналогичных экспериментов; они могут быть использованы для наполнения новых версий библиотек оцененных данных и для анализа состояния оценок в существующих библиотеках.

**Финансирование.** При выполнении данной работы гранты и любая другая финансовая поддержка не использовались.

**Конфликт интересов.** Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коцеев В. Н., Ломаков Г. Б., Мантуров Г. Н., Цибуля А. М. Тестирование ядерных данных свинца и железа в задачах с образованием  $\gamma$ -квантов для верификации отечественной системы константного обеспечения // Ядерная физика и инжиниринг. 2016. Т. 7, № 2. С. 187–194.

2. Шмаров А. Е., Гаганов В. В., Малькин А. Г. Дифференциальные сечения  $\gamma$ -образования, измеренные на 14,5-МэВ нейтронах для ядер элементов Al, Ti, Fe и изотопа  $^{239}\text{Pu}$ : Тестирование оцененных ядерных данных // ВАНТ. Сер.: Теор. и прикладная физика. 2023. № 1. С. 17–26.
3. Шмаров А. Е., Гаганов В. В. Спектры и сечения  $\gamma$ -образования под действием 14,5-МэВ нейтронов для ядер бора и кислорода, измеренные в интегральных экспериментах с образцами из  $\text{B}_4\text{C}$  и  $\text{BeO}$  // ВАНТ. Сер.: Теор. и прикладная физика. 2024. № 1. С. 31–34.
4. *Abramovich S. N., Nefedov Yu. Ya., Semenov V. I. et al.* Benchmark Experiments on Measurement of Neutron and Gamma-Ray Leakage Spectra and Yield from Three Vanadium Spheres // *Fusion Eng. Des.* 2001. V. 58–59. P. 601–606.
5. *Nefedov Yu. Ya., Nagornyi V. I., Semenov V. I. et al.* Results of Measurements of Gamma-Ray Production Cross Section and Spectra in Inelastic Interaction of 14 MeV Neutrons with Nuclei C, O, Mg, Al, Fe, Cu, Zr, Mo, W and Pb // *J. Nucl. Sci. Technol.* 2000. V. 37, No. 1. P. 692–696.
6. *Gaganov V. V., Vershinin I. S., Gusikhina I. A., Boriskov A. S.* Simulation of Recoil Proton Spectrum in a Detector of Proton Telescope Type in Registering DT Neutrons // *Phys. At. Nucl.* 2022. V. 85, No. 8. P. 1431–1438.
7. *Gaganov V. V.* Calculation of Neutron Spectra Produced in Neutron Generator Target: Code Testing // *Appl. Radiat. Isot.* 2018. V. 133. P. 85–87.
8. *Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др.* Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов,  $\gamma$ -квантов, электронов и позитронов // ВАНТ. Сер.: Мат. моделирование физ. процессов. 2011. № 1. С. 17–24.
9. *Zhuchko V. E., Ostapenko Yu. B., Soldatov A. S. et al.* Restoration of Photofission Cross-Sections from Bremsstrahlung Experiments // *Nucl. Instr. Meth.* 1976. V. 136, No. 2. P. 373–378.
10. *Bezotosnyj V. M., Gorbachev V. M., Shvetsov M. S., Surov L. M.* Group and Total Cross Sections of Formation of Gamma-Ray Quanta upon the Interaction of 14-MeV Neutrons with Various Nuclei // *Sov. At. Energy.* 1980. V. 49, No. 4. P. 690–694 (EXFOR subentry #40516).
11. *Hlavac S., Oblozinsky P.* A Multidetector Setup for ( $n$ ,  $xn$  gamma) Studies at 14 MeV // *Nucl. Instr. Meth.* 1983. V. 206, No. 1–2. P. 127–134 (EXFOR subentry #30801).
12. *Tanabe E., Shin K., Nakamura T.* Measurement of Gamma-Ray Production Cross Section of Iron for Incident Neutron Energies between 6 and 33 MeV // *J. Nucl. Sci. Technol.* 1994. V. 31, No. 11. P. 1133–1142 (EXFOR subentry #23010).
13. *Bondar V. M., Kadenko I. M., Leshchenko B. E. et al.* Cross Section of Prompt Gamma-Ray Production by Fast Neutrons on Iron and Bismuth Nuclei // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2009. V. 73, No. 11. P. 1511–1514 (EXFOR subentry #32223).