

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ ПРИ НЕЙТРОННОЙ НАКАЧКЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ, ОБРАЗОВАННОЙ ПАРОЙ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ГАДОЛИНИЯ

И. В. Шаманин¹, М. А. Казарян², В. В. Кнышев¹,
С. В. Беденко¹, В. И. Шаманин¹

В связи с возможностью нейтронной накачки активной среды, образованной изотопами гадолиния Gd^{155} и Gd^{156} , проведено численно-теоретическое исследование параметров спектра нейтронов в активной среде. Активная среда размещена в цилиндрическом объеме, выполненном из вольфрама. Рассмотрено несколько вариантов вольфрамовой колбы, заполненной компактным оксидом гадолиния, с отражателями и без отражателей из графита. Установлено, что при определенных сочетаниях геометрических параметров цилиндрического объема спектр нейтронов в активной среде обеспечивает возможность инверсии заселенности уровней возбуждения ядер изотопа Gd^{156} .

Ключевые слова: гадолиний, спектр нейтронов, вольфрам, метастабильные изотопы.

Введение. При решении различных задач медленной нуклидной кинетики применительно к физике и технике ядерных реакторов [1] мы обратили внимание на возможность накопления и неконтролируемого высвобождения избыточной энергии в нейтроно-поглощающих материалах по причине возможного накопления избыточной энергии в изомерных состояниях ядер атомов, входящих в состав некоторых из них, например, в изомерных состояниях ядер гафния или гадолиния [2]. Теоретические оценки, выполненные для цепочки ядерных процессов: ядро X + нейтрон \rightarrow ядро Y в возбужденном состоянии \rightarrow ядро Y в изомерном (метастабильном) состоянии \rightarrow ядро Z в

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Россия, Томск, пр. Ленина, 30; e-mail: shiva@tpu.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: kazar@sci.lebedev.ru.

основном состоянии, протекающих в среде, в составе которой имеется пара стабильных изотопов гадолиния. (Gd^{155} и Gd^{156}), показали возможность накачки среды нейтронами [3]. На рис. 1 приведена схема данного процесса.

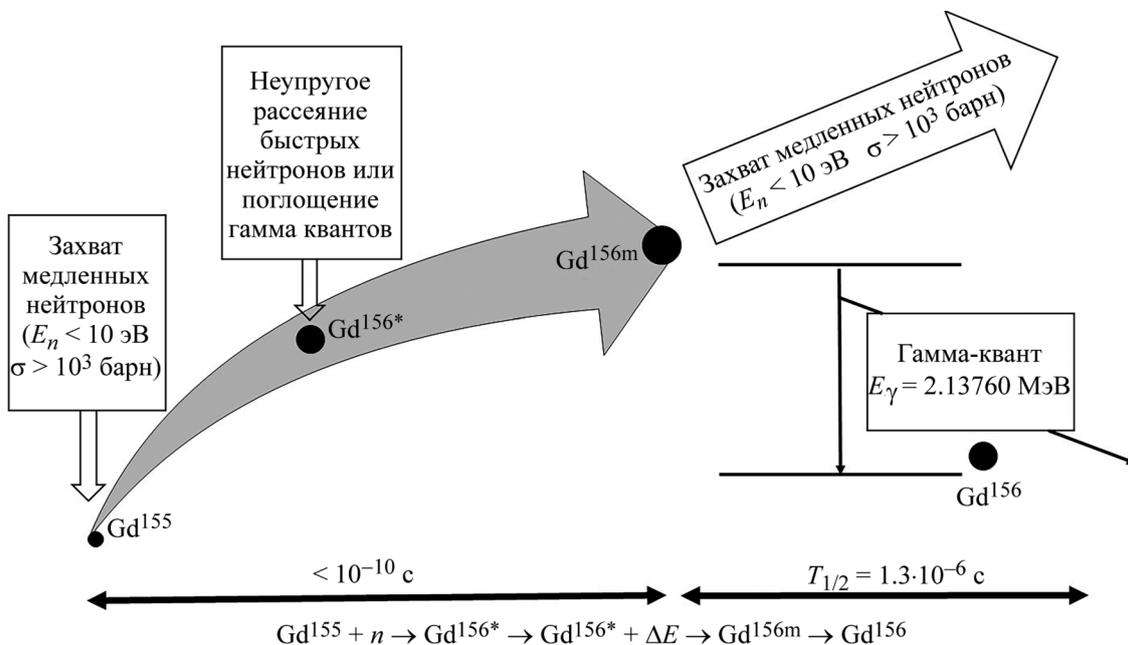


Рис. 1: Накачка среды, образованной ядрами изотопов гадолиния [3].

Прежде, чем оказаться в метастабильном состоянии, ядро Gd^{156} находится в возбужденном состоянии. Типичное значение времени жизни ядра в возбужденном состоянии составляет величину порядка 10^{-14} с, что на девять порядков больше времени ядерного взаимодействия. Поэтому в возбужденном состоянии ядро в состоянии принимать и сохранять энергию ΔE , переданную ему в результате рассеяний нейтронов на нем.

Средняя энергия нейтронов спектра деления составляют 2 МэВ. Средняя энергия нейтронов спектра ядерного реактора (даже на быстрых нейтронах) значительно ниже. Кроме того, для перевода ядер изотопа в возбужденное состояние путем прямого рассеяния нейтронов на ядрах необходимо “выбирать” изотопы не только с большой удельной энергией связи нуклонов в ядре, но и с малым значением сечения поглощения нейтронов. Поэтому для накопления ядер в возбужденных состояниях целесообразно получать их как продукт реакции радиационного захвата нейтронов ядрами с массовым числом на одну единицу меньше. Дочернее ядро образуется в возбужденном состоянии и, при необходимости, получает дополнительную энергию за счет рассеяния на нем нейтронов. В результате дочернее ядро оказывается в метастабильном состоянии.

Аналитические оценки показали, что при воздействии нейтронов с плотностью потока $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на активную среду, образованную парой ядер изотопов гадолиния (Gd^{155} и Gd^{156}), условие инверсии заселенности уровней ядер Gd^{156} достигается за несколько десятков секунд. Это объясняется почти уникальным сочетанием поглощающих свойств двух изотопов гадолиния (Gd^{155} и Gd^{156}) как в тепловой, так и резонансной областях энергии нейтронов.

Анализ зависимостей микросечений радиационного захвата нейтронов ядрами изотопов гадолиния от энергии нейтронов, представленных в [4], указывает на удачное сочетание свойств пары изотопов с массовыми числами 155 и 156, состоящее в преимущественном поглощении нейтронов легким изотопом в достаточно широком интервале энергий.

Сечение реакции радиационного захвата нейтронов ядрами Gd^{155} на 3–4 порядка превосходит таковое для ядер Gd^{156} при энергиях нейтронов до 10 эВ, резонансный интеграл для ядер Gd^{155} значительно превосходит таковой для ядер Gd^{156} . Скорость “наработки” метастабильных ядер $\text{Gd}^{156\text{m}}$ значительно выше их “расстрела” нейтронами и скорости их перехода в основное состояние уже при плотностях потока резонансных и тепловых нейтронов порядка $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Дальнейшее увеличение плотности потока нейтронов приводит к сокращению промежутка времени, по истечении которого начинается накопление избыточной энергии. В результате при умеренных плотностях

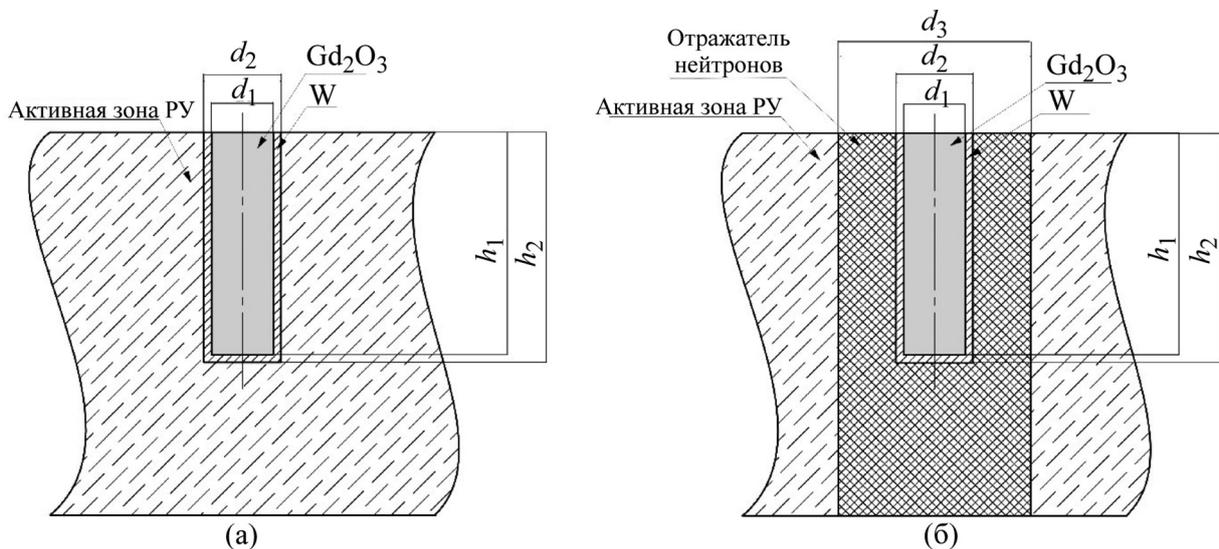


Рис. 2: Схема размещения вольфрамовой колбы в реакторной установке: (а) без отражателя; (б) с отражателем.

потока нейтронов следует ожидать быстрого накопления избыточной энергии в метастабильном состоянии ядер изотопа гадолиний-156.

Таким образом, возникла задача исследования спектра нейтронов в активной среде, в составе которой имеются ядра пары изотопов гадолиния с массовыми числами 155 и 156, при решении которой необходимо было выяснить – можно ли создать условия для обеспечения максимально возможных потоков нейтронов в подходящих энергетических интервалах?

Результаты численного моделирования. Для проведения исследования накопления избыточной энергии в Gd использовалась следующая система размещения Gd_2O_3 в активной зоне реакторной установки (см. рис. 2).

Gd_2O_3 помещается в емкость в виде цилиндра из чистого вольфрама. Далее сам цилиндр размещают в активной зоне реакторной установки. В качестве реакторной установки выбран вариант уран-графитового реактора с целью исследования образца в спектре тепловых нейтронов [5–9].

В работе рассмотрены несколько вариантов вольфрамовой колбы, с отражателем и без отражателя (см. табл. 1). В качестве отражателя выступает графитовый блок. Изотопный состав Gd состоит из 50% Gd^{155} и 50% Gd^{156} .

Т а б л и ц а 1

Геометрические характеристики вольфрамовой колбы с Gd_2O_3

	d_1 , см	d_2 , см	d_3 , см	h_1 , см	h_2 , см
Без отражателя					
5_get	5	7	–	30	31
10_get	10	12	–	30	31
С отражателем					
5_get + C	5	7	30	30	31
10_get + C	10	12	30	30	31

Расчет нейтронно-физических характеристик проводился в специализированной программе WIMSD-5B.12 (OECD Nuclear Energy Agency). Программа WIMS применяется для расчетов тепловых и быстрых реакторов. Она успешно применяется и для проектирования реакторов, и для расчетов и анализа различных эффектов в существующих реакторных установках. В настоящее время программа использует универсальную 69-групповую библиотеку констант, подготовленную на основе файлов оцененных нейтронных данных (ENDF, JEF, JENDL и т.д.) [8–14].

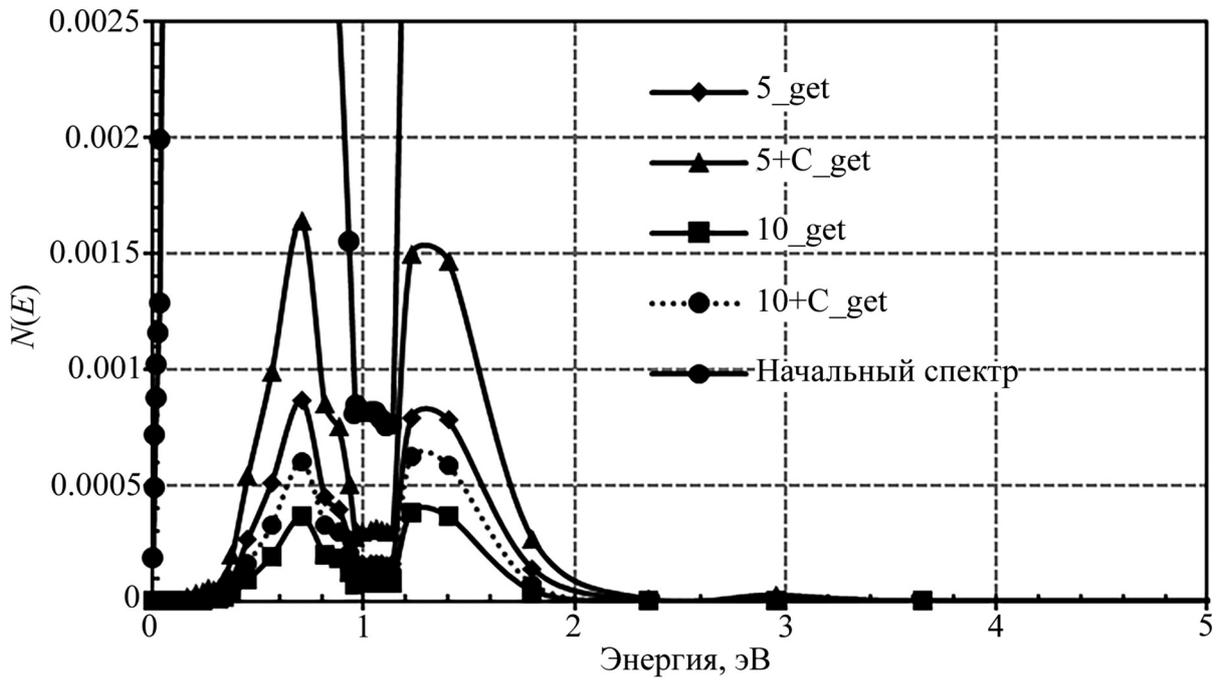


Рис. 3: Спектр в интервале энергий от 0 до 5 эВ.

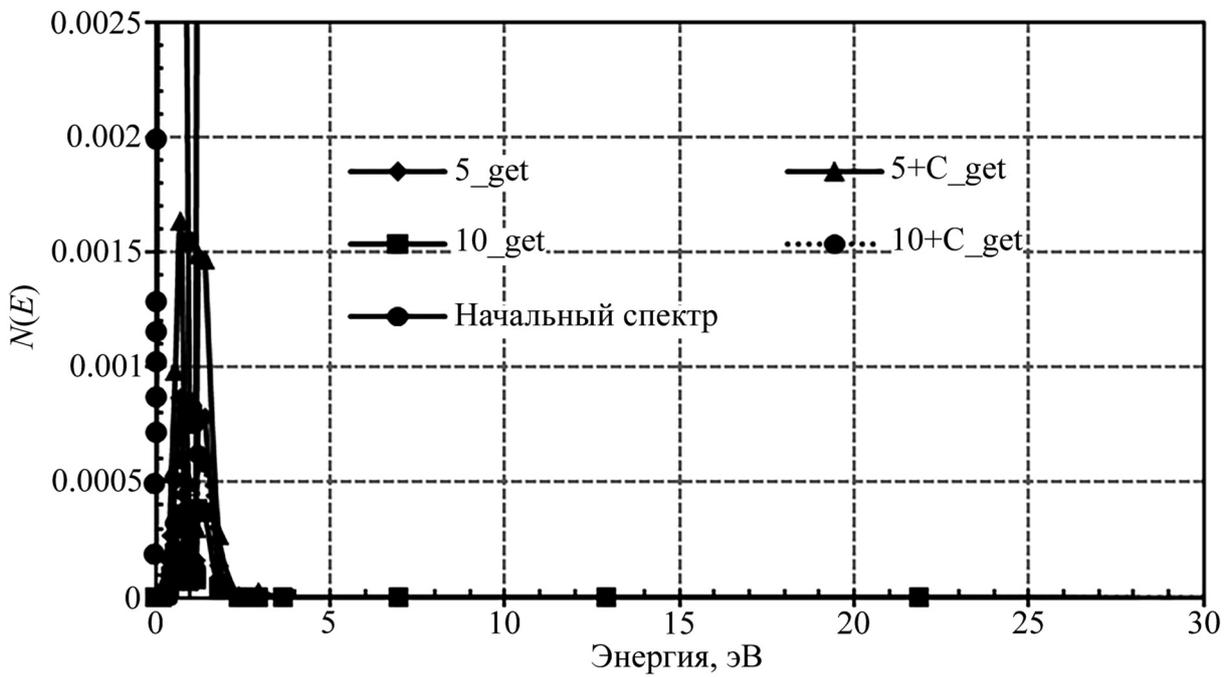


Рис. 4: Спектр в интервале энергий от 0 до 30 эВ.

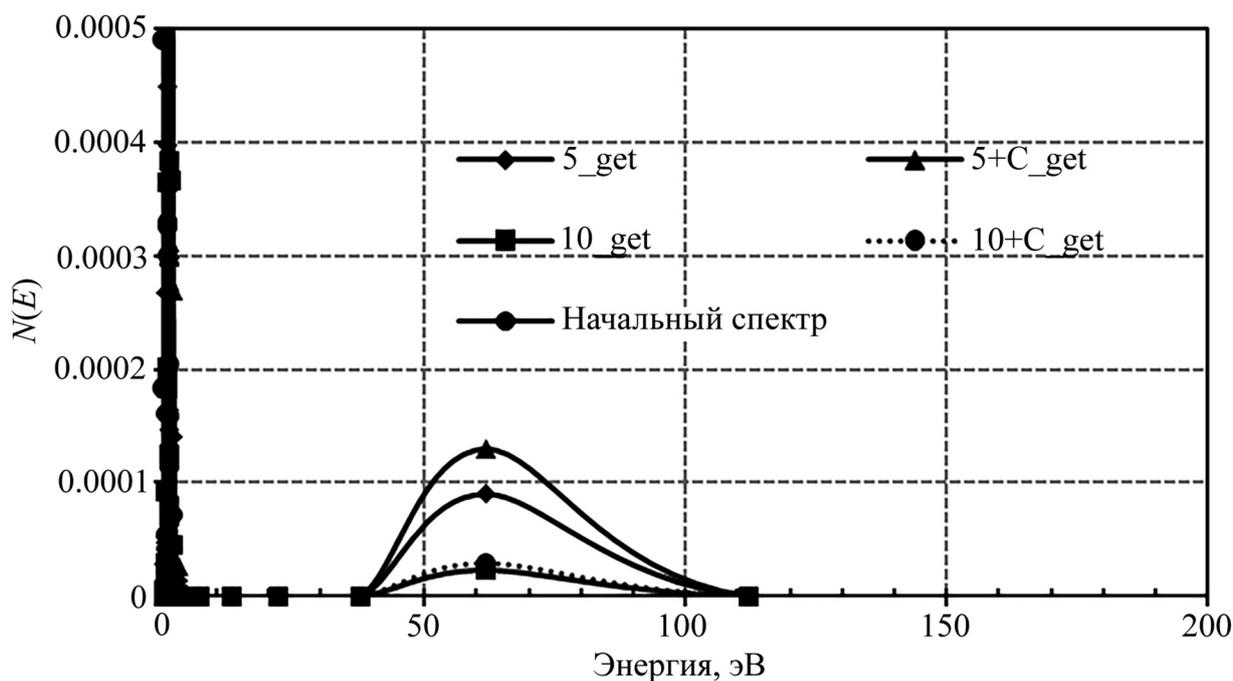


Рис. 5: Спектр в интервале энергий от 0 до 200 эВ.

Расчет проведен для всех вариантов размещаемого образца. Для сравнения и анализа получаемых результатов проведен предварительный расчет *начального спектра* в области размещения образца в активной зоне реактора, т.е. спектра нейтронов в пустой полости, имеющей форму образца. Результаты расчета спектра в размещаемом образце представлены на рис. 3–5.

Сформированный в активной среде спектр нейтронов имеет четкий максимум в области энергий нейтронов от тепловой до 3 эВ. Это обеспечивает быструю “наработку” метастабильных ядер Gd^{156m} из ядер Gd^{155} . При этом ядра Gd^{156} , изначально входящие в состав активной среды, практически “не расстреливаются” нейтронами. Переход из метастабильного состояния ядер Gd^{156m} в основное сопровождается испусканием гамма-квантов, часть которых обеспечивает обратный перевод ядер Gd^{156} в метастабильное состояние. Создаются условия, необходимые для инверсии заселенностей энергетических уровней ядер Gd^{156} .

Заключение. Формирование спектра нейтронов с параметрами, обеспечивающими накопление избыточной энергии в активной среде, образованной атомами пары стабильных изотопов гадолиния с массовыми числами 155 и 156, за счет образования ядер атомов в изомерном состоянии при радиационных захватах нейтронов ядрами изото-

па с меньшей массой возможно. При накачке активной среды, образованной ядрами гадолиния, нейтронами с плотностью потока порядка 10^{13} см⁻²·с⁻¹ условие инверсии заселенности уровней может быть достигнуто за несколько десятков секунд. Длина волны генерируемого средой излучения составляет 0.0006 нм. Как претендент на роль активной среды может быть рассмотрена спеченная керамика на основе обогащенного по 155-му изотопу оксида гадолиния Gd₂O₃.

Активная среда размещена в цилиндрическом объеме, выполненном из вольфрама. Вольфрам характеризуется относительно небольшим (до 1 барн) сечением захвата нейтронов в широком интервале энергий нейтронов. Возможны несколько вариантов исполнения вольфрамовой колбы, заполненной компактным оксидом Gd₂O₃, с отражателем и без отражателя из графита. Каждый из вариантов обеспечивает “вырезание” из общего потока нейтронов той части, которая создает условия для инверсии заселенностей энергетических уровней ядер Gd¹⁵⁶.

Представлены результаты нейтронно-физического исследования активной среды. Нейтронно-физический расчет осуществлен с помощью специализированной программе WIMSD-5B.12 (OECD Nuclear Energy Agency).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. В. Шаманин, С. В. Беденко, А. О. Павлюк, В. А. Лызко, Известия ТПУ **317**(4), 25 (2010).
- [2] I. V. Shamanin and M. A. Kazaryan, Bulletin of the Lebedev Physics Institute **44**(7), 215 (2017).
- [3] M. A. Kazaryan, et al., Proc. SPIE **10614** (International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII, Tomsk), 1061416 (2018); doi: 10.1117/12.2303517.
- [4] Evaluated Nuclear Data File (ENDF) <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>. Дата обращения 27.04.2018.
- [5] I. K. Lyovina, V. A. Sidorenko, Sov. Atom. Energ. **60**(4), 283 (1986).
- [6] Н. А. Доллежалъ, И. Я. Емельянов, *Канальный ядерный энергетический реактор* (М., Атомиздат, 1980).
- [7] E. V. Kulikov, Sov. Atom. Energ. **56**(6), 368 (1984).
- [8] V. S. Romanenko and A. V. Krayushkin, Sov. Atom. Energ. **53**(6), 816 (1982).

- [9] T. D. Newton, The Development of modern design and reference core neutronics methods for PBMR. In: Serco Assurance (Winfrith Technology Center, Dorchester, Dorset DT2 8ZE. UK, 2004). https://www.answerssoftwareservice.com/resource/pdfs/enc_pmbr_paper.pdf.
- [10] B. A. Lindley, J. G. Hosking, P. J. Smith, et al., *Ann. of Nucl. Energ.* **102**, 148 (2017).
- [11] I. V. Shamanin, V. M. Grachev, Y. B. Chertkov, et al., *Ann. of Nucl. Energ.* **113**, 286 (2018).
- [12] T. S. Poveshchenko, N. I. Laletin, *Atom. Energ.* **120**(3), 165 (2016).
- [13] D. Altiparmakov, R. Wiersma, *Nucl. Sc. Eng.* **182**(4), 395 (2016).
- [14] V. Galchenko, A. Mishyn, *Nucl. and Rad. Saf.* **3**(67), 8 (2015).

Поступила в редакцию 9 июня 2018 г.