



АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC ENERGY

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 22.02.18. Ред. рег. № 2643

The article has entered in publishing office 22.02.18. Ed. reg. No. 2643

УДК 66.085

**УСЛОВИЯ ИНВЕРСИИ ЗАСЕЛЕННОСТЕЙ УРОВНЕЙ
ПРИ НЕЙТРОННОЙ НАКАЧКЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ,
ОБРАЗОВАННОЙ ПАРОЙ ИЗОТОПОВ ГАДОЛИНИЯ Gd^{155} и Gd^{156} *****И.В. Шаманин¹, М.А. Казарян²**¹Национальный исследовательский Томский политехнический университетд. 30, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия
тел.: +7 (3822) 60-61-12; e-mail: shiva@tpu.ru²Физический институт им. П.Н.Лебедева РАНд. 53, Ленинский просп., Москва, ГСП-1, 117924, Россия
тел.: +7 (499) 132-61-47; e-mail: kazar@sci.lebedev.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.055-062

Заключение совета рецензентов: 27.03.18 Заключение совета экспертов: 12.04.18 Принято к публикации: 15.05.18

Теоретически изучена возможность преобразования энергии быстрых и эпитепловых нейтронов в энергию моноэнергетического фотонного излучения за счет нейтронной накачки активной среды, образованной ядрами с долгоживущими изомерными состояниями. Впервые принят во внимание канал образования ядра в изомерном состоянии как дочернего ядра, являющегося продуктом реакции радиационного захвата нейтрона более легким ядром. Проведены оценки параметров спектра потока нейтронов, обеспечивающих перевод из основного в одно из возбужденных состояний для ядер изотопов ${}_{54}\text{Xe}^{130}$, ${}_{10}\text{Ne}^{22}$. Показано, что 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. Проведен анализ зависимости сечений радиационного захвата нейтронов ядрами изотопов гадолиния Gd^{155} и Gd^{156} , в результате которого установлено, что скорость образования ядер Gd^{156} превосходит скорость их «выгорания» в потоке нейтронов. Это обеспечивается уникальным сочетанием поглощающих свойств двух изотопов гадолиния Gd^{155} и Gd^{156} как в тепловой, так и резонансной областях энергии нейтронов. Сформулированы условия, необходимые для перевода ядер изотопа в возбужденное состояние путем прямого рассеяния нейтронов на ядрах и для накопления ядер в возбужденных состояниях. В результате аналитического решения системы дифференциальных уравнений нуклидной кинетики с учетом распада изомерных состояний ядер получено соотношение, позволяющее проводить оценки параметров процессов захвата нейтронов ядрами, образования и распада изомерных состояний ядер. Проведен анализ возможности нейтронной накачки активной среды, образованной ядрами изотопа гафния. Установлено, что свойства ядер изотопов гафния не позволяют обеспечить условия инверсии заселенности энергетических уровней за счет образования в потоке нейтронов ядер гафния в изомерном состоянии Hf^{178m2} . Показана возможность накопления избыточной энергии в активной среде, образованной ядрами пары изотопов гадолиния Gd^{155} и Gd^{156} , за счет образования и накопления ядер в изомерном состоянии при радиационных захватах нейтронов ядрами стабильного изотопа с меньшей массой. Сформулирован вывод о том, что при накачке активной среды, образованной ядрами гадолиния, нейтронами с плотностью потока порядка $10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ условие инверсии заселенности уровней может быть достигнуто за несколько десятков секунд. Длина волны генерируемого

*Шаманин И.В., Казарян М.А. Условия инверсии заселенностей уровней при нейтронной накачке активной среды, образованной парой изотопов гадолиния Gd^{155} и Gd^{156} // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;16-18:55-62.

средой излучения составляет 0,0006 нм. В качестве претендента на роль активной среды может быть рассмотрена спеченная керамика на основе обогащенного по 155-му изотопу оксида гадолиния Gd_2O_3 . Таким образом, существует возможность создания лазерной техники нового поколения с параметрами, обеспечивающими ее применение в импульсной энергетике будущего.

Ключевые слова: активная среда; инверсия заселенностей уровней; изотопы гадолиния; нейтронная накачка.

CONDITIONS FOR POPULATION OF ENERGY LEVELS INVERSION WHEN ACTIVE MEDIUM BASED ON GADOLINIUM ISOTOPES Gd^{155} AND Gd^{156} COUPLE NEUTRON PUMPING

I.V. Shamanin¹, M.A. Kazaryan²

¹National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia
tel.: +7 (3822) 60 61 12, e-mail: shiva@tpu.ru

²P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
53 Leninskiy Av., Moscow, GSP-1, 117924, Russia
tel.: +7 (499) 132 61 47, e-mail: kazar@sci.lebedev.ru

doi: 10.15518/isjeee.2018.16-18.055-062

Referred 27 March 2018 Received in revised form 12 April 2018 Accepted 15 May 2018

The paper theoretically studies the possibility of energy transformation of fast and epithermal neutrons to energy of coherent photon radiation at the expense of a neutron pumping of the active medium formed by nucleus with long-living isomeric states. The channel of the nucleus formation in isomeric state as a daughter nucleus resulting from the nuclear reaction of neutron capture by a lighter nucleus is taken into consideration for the first time. Assessment of neutron flux spectrum parameters providing transition from the main state into one of the excited ones for the nuclei of isotopes $^{130}_{54}Xe$, $^{22}_{10}Ne$ is made. It was shown that to transit the isotope nuclei into the excited state by forward neutron scattering on the nuclei it is necessary to "select" the isotopes not only with great specific energy of nucleons coupling but also with a small value of the neutron absorption cross section. Moreover, the paper performs the analysis of cross sections dependence of radiative neutron capture by the nuclei of gadolinium isotopes Gd^{155} and Gd^{156} . As a result, the speed of Gd^{156} nuclei formation is stated to exceed the speed of their "burnup" in the neutron flux. It is provided by a unique combination of absorbing properties of two isotopes of gadolinium Gd^{155} and Gd^{156} in both thermal and resonance regions of neutron energy. We have formulated the conditions required for making isotope nuclei excited by forward neutron scattering on nuclei and for storing nuclei in excited states. The relation which allows estimating processes parameters of neutron capture by nuclei, formation and decay of nuclei isomeric states is obtained as a result of analytical solution of differential equations system of nuclide kinetics taking into account the decay of nuclei isomeric states. The paper makes the possibility analysis of neutron pumping of the participating medium created by the hafnium isotope nuclei. The properties of hafnium isotopes nuclei is found to do not allow providing conditions for population inversion of energy levels due to the formation of hafnium nuclei in isomeric state Hf^{178m2} in the neutron flux. The paper shows the possibility of excess energy accumulation in the participating medium created by the nuclei of the pair of gadolinium isotopes Gd^{155} and Gd^{156} due to formation and storage of nuclei in isomeric state at radiative neutron capture by the nuclei of the stable isotope with a smaller mass. It is concluded that when the active medium created by gadolinium nuclei is pumped by neutrons with the flux density of the order of $10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, the condition of levels population inversion can be achieved in a few tens of seconds. The wave length of the radiation generated by the medium is 0.0006 nm. Sintered ceramics Gd_2O_3 based on enriched in the 155-th isotope of gadolinium can be considered a possible active medium. Thus, there is a possibility of creation of the laser techniques of new generation with the parameters providing its application in pulse power engineering of the future.

Key words: active medium; inversion of levels population; gadolinium isotopes; neutron pumping.





Игорь Владимирович Шаманин
Igor Shamanin

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор, руководитель Отделения естественных наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Образование: Томский политехнический институт (1985 г.).

Область научных интересов: ядерные физика и технологии

Публикации: 307
h-index 5; Scopus 5; РИНЦ 8, WoS 5.

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Chief of Nature Sciences Department, National Research Tomsk Polytechnic University.

Education: Tomsk Polytechnic Institute, 1985.

Research interests: nuclear physics and technologies.

Publications: 307.



Мишик Айразатович Казарян
Mishik Kazaryan

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1970 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 600.
h-index 9, Scopus 9, РИНЦ 10, WoS 9.

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1970.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 600.

1. Введение

В данной работе под активной средой понимается вещество, в котором возможно создать инверсию населенностей энергетических уровней ядер атомов за счет реакции радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах атомов, входящих в состав вещества. Совокупность ядерных превращений, протекающих в веществе под действием потока нейтронов, называют нуклидной кинетикой. Дифференциальные и интегральные характеристики нуклидной кинетики определяют изотопный состав вещества, которое находится или находилось в поле нейтронов. Важнейшее на сегодня приложение результатов исследований нуклидной кинетики – это физика и техника ядерных реакторов [1, 2], в частности, ядерная безопасность этих реакторов. Авторы данной статьи обратили внимание на возможность неконтролируемого высвобождения избыточной

энергии в нейтронно-поглощающих материалах по причине её накопления в изомерных состояниях ядер атомов, входящих в состав некоторых из них. Например, в изомерных состояниях ядер гафния или гадолиния. Возможность накачки гамма-квантами среды, образованной ядрами гафния, была изучена в работе [3], результаты исследований которой показали, что внешний поток гамма-квантов не может обеспечить условия для инверсии заселенностей энергетических уровней метастабильных ядер.

Управление процессом накопления энергии в изомерных состояниях ядер открывает возможность создания условий и техники для генерации моноэнергетического излучения, то есть для создания лазерной техники. В работе впервые изучена возможность нейтронной накачки активной среды, образованной ядрами пары стабильных изотопов гадолиния – Gd^{155} и Gd^{156} .

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
λ	Постоянная распада нестабильного ядра, c^{-1}
σ	Микроскопическое сечение ядерной реакции, cm^2
Φ	Плотность потока нейтронов, $n \cdot cm^{-2} \cdot c^{-1}$
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A	Массовое число ядра, отн. ед.
E	Энергия, МэВ
S	Критерий достижения условия инверсии заселенностей уровней, безразмерный
x, y, z	Концентрации ядер, cm^{-3}
<i>Индексы верхние</i>	
i	Номер уровня возбуждения ядра
<i>Индексы нижние</i>	
n	Нейтронный
nu	Ядерный



2. Теоретические оценки

Рассмотрим поглощающий нейтроны материал, в котором под действием нейтронов протекают процессы: ядро X + нейтрон → ядро Y в возбужденном состоянии → ядро Y в изомерном (метастабильном) состоянии → ядро Z в основном состоянии. Напри-

мер: $Gd^{155} + n \rightarrow Gd^{156*} \rightarrow Gd^{156m} \rightarrow Gd^{156}$. При этом ядра Y и Z тоже испытывают радиационный захват, то есть «расстреливаются». Изомер Gd^{156m} имеет период полураспада 1,3 мкс и распадается с испусканием гамма-кванта с энергией 2,1376 МэВ. На рис. 1 приведена схема данного процесса.

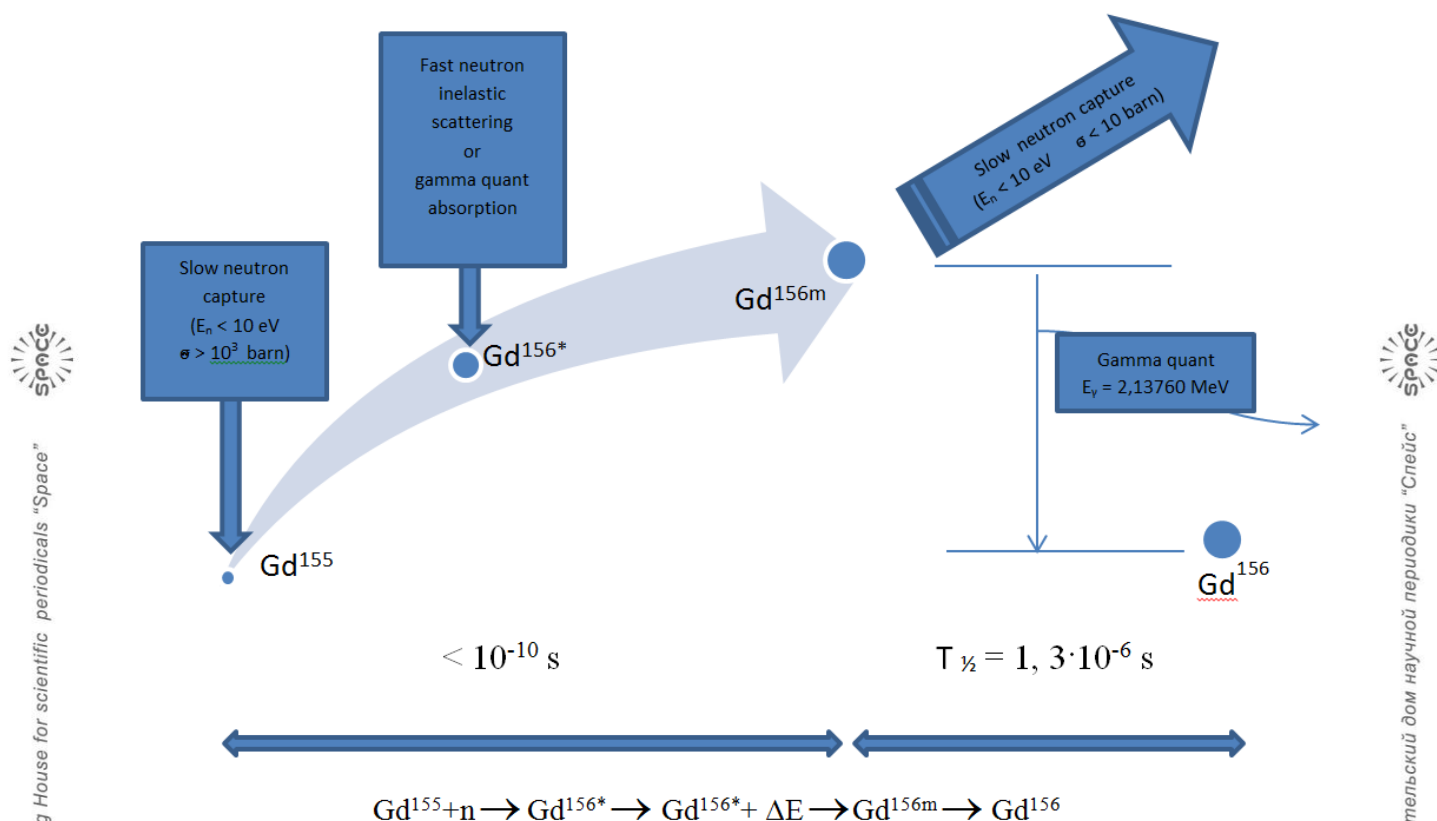


Рис. 1 – Накачка среды, образованной ядрами изотопов гадолиния
Fig.1– Pumping of medium consisting of gadolinium isotopes nuclei

В таблице приведены параметры ядер двух изотопов гадолиния, находящихся в основном и изомерном состояниях.

Параметры ядер изотопов гадолиния
Gadolinium isotopes nuclei parameters

Таблица
Table

Ядро	Период полураспада	Содержание в естественной смеси изотопов	Спин и четность ядра
^{155}Gd	стабилен	14,80 %	3/2-
^{155m}Gd	31,97 мс		11/2-
^{156}Gd	стабилен	20,47 %	0+
^{156m}Gd	1,3 мкс		7-

Прежде чем оказаться в метастабильном состоянии, ядро ^{156}Gd находится в возбужденном состоянии. Типичное значение времени жизни ядра в возбужденном состоянии составляет порядка 10^{-14} с, что на девять порядков больше времени ядерного взаимодействия. В связи с этим в возбужденном состоянии ядро может принимать и сохранять энер-

гию ΔE , переданную ему в результате рассеяний нейтронов на нем. Энергия, передаваемая ядру при рассеянии на нем нейтрона, зависит от массы ядра – чем меньше масса ядра, тем большую энергию передает ему нейтрон при рассеянии. В идеальном случае масса ядра и энергия нейтрона таковы, что переданная при рассеянии энергия ΔE составляет

значение, равное разности между энергией метастабильного состояния и энергией возбуждения. Для заданного значения энергии нейтрона E_n значение

$$\frac{\Delta E^i}{E_n} = \frac{2A}{(A+1)^2} \left(1 + \frac{A+1}{2} \cdot \frac{\Delta E^i}{E_n} - 0,07A^{2/3} E_n \sqrt{1 - \frac{A+1}{A} \cdot \frac{\Delta E^i}{E_n}} \right),$$

где A – массовое число ядра. Уравнение получено исходя из того, что переданная энергия ΔE равна энергии возбуждения ядра из основного состояния. Если у ядра несколько уровней возбуждения ($i = 1, 2, 3 \dots$), то уравнение позволяет определить значение энергии нейтрона E_n , обеспечивающее перевод ядра на соответствующий уровень возбуждения.

Количество столкновений (рассеяний) нейтронов с ядрами активной среды, происходящих в единице объема среды в единицу времени, определяется соотношением:

$$\Phi \sigma n_{\text{mic}},$$

где Φ – плотность потока нейтронов; σ – микроскопическое сечение неупругого рассеяния нейтронов на ядрах; n_{mic} – количество ядер в единице объема среды. При этом частота рассеяний, испытываемых нейтроном в активной среде, определяется соотношением:

$$\nu \sigma n_{\text{mic}},$$

где ν – скорость нейтронов ($\nu = \sqrt{2E/m}$).

Например, для перевода из основного в возбужденное состояние ядер изотопа ${}_{54}\text{Xe}^{130}$, у которых существуют 3 уровня возбуждения (0,54 МэВ, 1,21 МэВ и 1,95 МэВ), требуется наличие в потоке нейтронов с энергиями 0,709 МэВ, 1,285 МэВ и 2,005 МэВ соответственно. Для перевода из основного в возбужденное состояние ядер изотопа ${}_{10}\text{Ne}^{22}$, у которых существуют 3 уровня возбуждения, требуется наличие в потоке нейтронов с энергиями 2,075 МэВ, 3,747 МэВ и 4,859 МэВ соответственно. Средняя энергия нейтронов спектра деления составляет 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 рассеяний на нем нейтронов. В результате дочернее ядро оказывается в метастабильном состоянии.

переданной при неупругом рассеянии на ядре энергии ΔE можно определить из трансцендентного уравнения:

Для проведения оценок возможности накопления энергии в изомерных состояниях ядер за счет радиационного захвата нейтронов в таком материале необходимо решить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma_1 x \Phi; \\ \frac{dy}{dt} = \sigma_1 x \Phi - \sigma_2 x \Phi - \lambda y; \\ \frac{dz}{dt} = -\sigma_3 z \Phi + \lambda y. \end{cases}$$

Здесь $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – концентрации ядер; Φ – плотность потока нейтронов; σ – микросечение радиационного захвата нейтронов; λ – постоянная распада ядер-изомеров.

Решение системы уравнений дает формулу для определения возможности достижения условия, при котором концентрация ядер в изомерном состоянии $y(t)$ становится больше или равной концентрации ядер в основном состоянии $z(t)$ при воздействии нейтронов с плотностью потока Φ до $10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:

$$\frac{y(t)}{z(t)} \approx \frac{\lambda t - (\sigma_1 - \sigma_2) \Phi t}{S \lambda},$$

где

$$S = \frac{1 - (\lambda + 2\sigma_3 \Phi) t}{\lambda + \sigma_3 \Phi} - \frac{1 - (\sigma_1 - \sigma_2 + 2\sigma_3) \Phi t}{(\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3) \Phi} + \frac{(\lambda - (\sigma_1 - \sigma_2) \Phi)(1 - \sigma_3 \Phi t)}{(\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3) \Phi (\lambda + \sigma_3 \Phi)}.$$

При воздействии нейтронов с плотностью потока $\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на поглотитель нейтронов, образованный ядрами гадолиния, условие $\frac{y(t)}{z(t)} \approx 1$ достигается за несколько десятков секунд. Это объясняется почти уникальным сочетанием поглощающих свойств двух изотопов гадолиния (${}^{155}\text{Gd}$ и ${}^{156}\text{Gd}$) как в тепловой, так и резонансной областях энергии нейтронов.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки возможности накопления энергии в изомерных состояниях ядер за счет радиационного захвата нейтронов в таком материале.



На рис. 2–5 приведены зависимости микросечений радиационного захвата нейтронов ядрами изотопов гадолиния по данным [4].

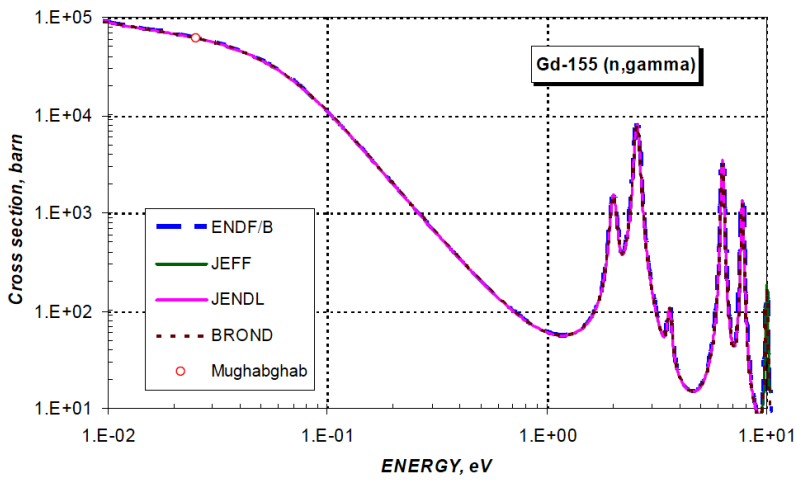


Рис. 2 – Сечение радиационного захвата нейтронов ядрами ^{155}Gd при энергиях нейтронов до 10 эВ

(в системе уравнений кинетики – σ_1)

Fig. 2 – ^{155}Gd nuclei neutron capture cross sections for neutrons energy up to 10 eV (in the equations system – σ_1)

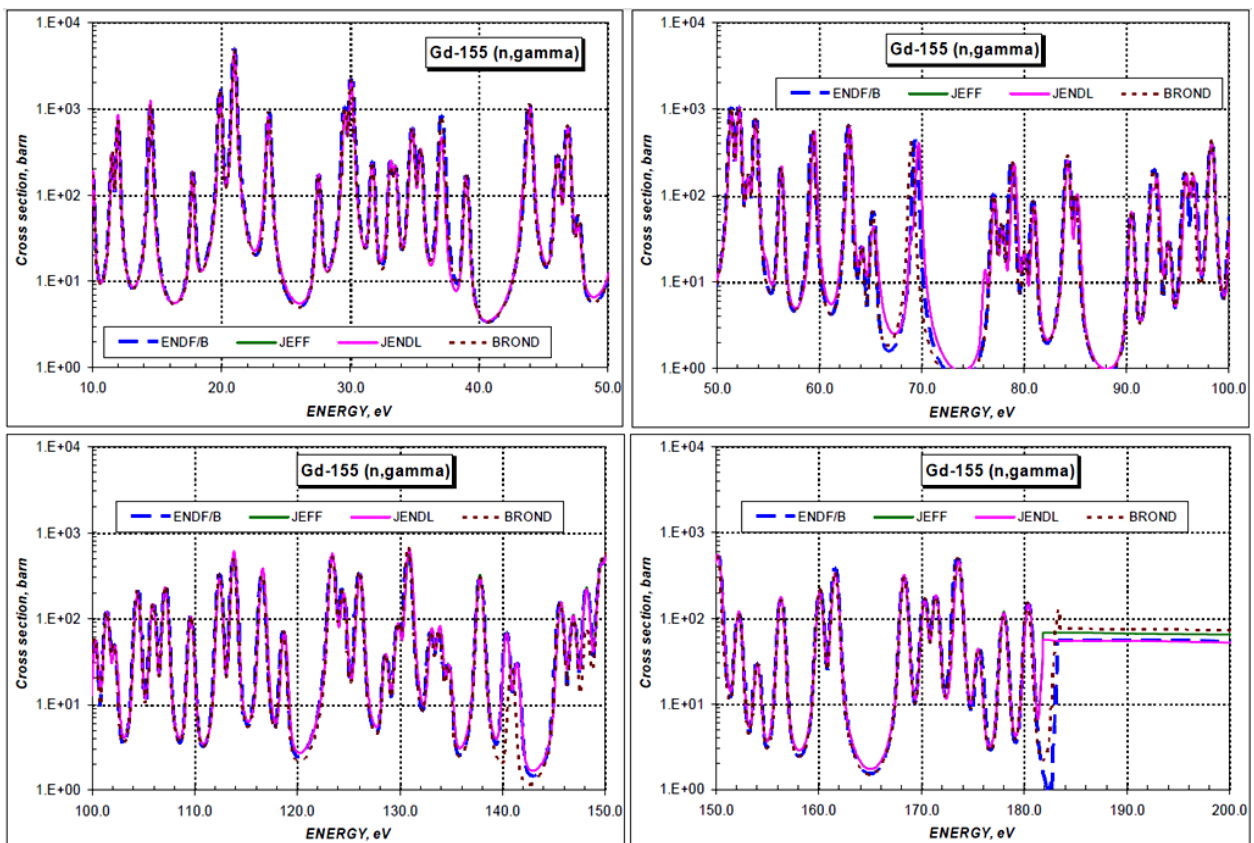


Рис. 3 – Сечение радиационного захвата нейтронов ядрами ^{155}Gd при энергиях нейтронов до 200 эВ (в системе уравнений кинетики – σ_1)

Fig. 3 – ^{155}Gd nuclei neutron capture cross sections for neutrons energy up to 200 eV (in the equations system – σ_1)



Рис. 4 – Сечение радиационного захвата нейтронов ядрами ^{156}Gd при энергиях нейтронов до 10 эВ

(в системе уравнений кинетики – σ_2)

Fig. 4 – ^{156}Gd nuclei neutron capture cross sections for neutrons energy up to 10 eV (in the equations system – σ_2)

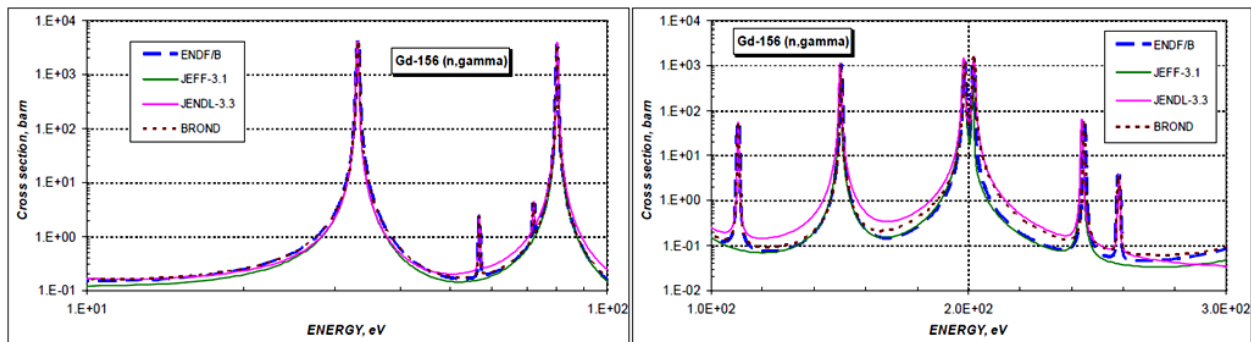
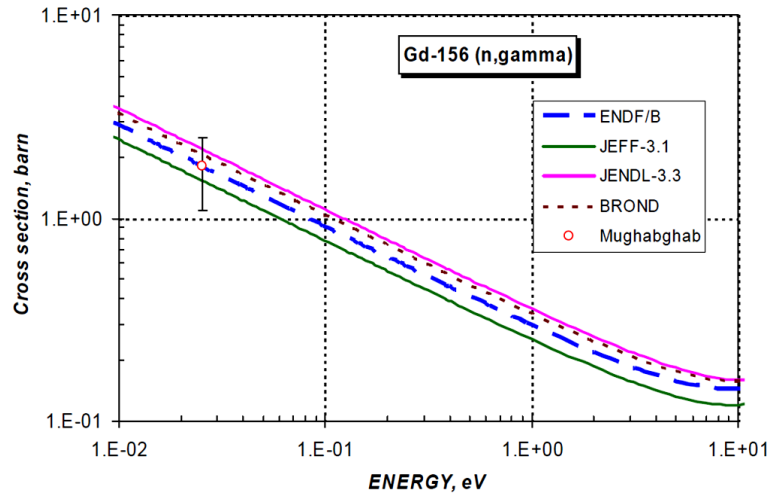


Рис. 5 – Сечение радиационного захвата нейтронов ядрами ^{156}Gd при энергиях нейтронов до 300 эВ (в системе уравнений кинетики – σ_2)

Fig. 5 – ^{156}Gd nuclei neutron capture cross sections for neutrons energy up to 300 eV (in the equations system – σ_2)

Сечение реакции радиационного захвата нейтронов ядрами ^{155}Gd на $3 \div 4$ порядка превосходит такое для ядер ^{156}Gd при энергиях нейтронов до 10 эВ, резонансный интеграл для ядер ^{155}Gd значительно превосходит таковой для ядер ^{156}Gd . Скорость «наработки» метастабильных ядер ^{156m}Gd 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. Таким образом, следует ожидать быстрого накопления избыточной энергии в метастабильном состоянии ядер изотопа гадолиний-156.

Для сравнения способности накапливать энергию в изомерных состояниях при возбуждении ядер по схеме, представленной на рис. 1, рассмотрим стабильный изотоп $^{72}\text{Ni}^{178}$. Метастабильные ядра гафния- $178m^2$ образуются из ядер гафния-178 (стабильный изотоп, содержание в естественной смеси 27,28 %). По современным данным [5] энергия излучаемого гамма-кванта 2,446 МэВ при переходе в основное состояние и период полураспада 31,0 года соответствует метастабильным ядрам гафния- $178m^2$. Для ме-

тастабильных ядер гафния- $178m^3$ (более высокий уровень энергии) эти параметры другие – 2,534 МэВ и 68 мкс, для метастабильных ядер гафния- $178m^1$ – 1,147 МэВ и 4 с.

Метастабильные ядра гафния- $178m^2$ образуются не только при неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядрах гафния-178, но и при радиационном захвате нейтронов ядрами гафния-177 (стабильный изотоп, содержание в естественной смеси 18,6 %). В результате захвата нейтрона образуется составное ядро гафния-178* в сильно возбужденном состоянии. Энергия возбуждения равна сумме энергии связи нейтрона в ядре и кинетической энергии нейтрона. Время жизни составного ядра в возбужденном состоянии составляет не более 10^{-13} с, возбуждение снимается испусканием высокоэнергетического гамма-кванта, ядро переходит либо в основное, либо в одно из метастабильных состояний.

Сечение неупругого рассеяния нейтронов на ядрах гафния-178 не превышает 2,5 барн в широком интервале энергий нейтронов, что приводит к невозможности накопления значительного количества энергии в изомерных состояниях только за счет неупругих рассеяний даже при плотностях потока ней-



тронов $\Phi - 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Условие $\frac{y(t)}{z(t)} \geq 1$ только за

счет неупругих рассеяний будет достигнуто через очень большой промежуток времени. Баланс ядер гафния-178, находящихся в изомерном состоянии m^2 , улучшается, если учесть их образование за счет радиационного захвата нейтронов ядрами гафния-177. Сечение данного процесса составляет сотни барн для тепловых нейтронов и превышает 1 барн для нейтронов с энергией до 100 эВ. Условие $\frac{y(t)}{z(t)} \geq 1$ с уче-

том радиационных захватов нейтронов может быть достигнуто через значительно меньший промежуток времени, но если учесть радиационный захват нейтронов ядрами гафния-178 и ядрами его изомеров (сечение процесса для тепловых нейтронов составляет десятки барн), в результате которого все эти ядра исчезают, то условие $\frac{y(t)}{z(t)} \geq 1$ может быть не достигнуто в принципе.

3. Заключение

Накопление избыточной энергии в активной среде, образованной атомами стабильных изотопов гадолиния с массовыми числами 155 и 156, за счет образования ядер атомов в изомерном состоянии при радиационных захватах нейтронов ядрами изотопа с меньшей массой возможно. При накачке активной среды, образованной ядрами гадолиния, нейтронами с плотностью потока порядка $10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ условие инверсии заселенности уровней может быть достигнуто за несколько десятков секунд. Длина волны генерируемого средой излучения составляет 0,0006 нм. В качестве претендента на роль активной среды может быть рассмотрена спеченная керамика на основе обогащенного по 155-му изотопу оксида гадолиния Gd_2O_3 . Активная среда может быть размещена в цилиндрическом объеме, выполненном из вольфрама, поскольку вольфрам характеризуется относительно небольшим (до 1 барн) сечением захвата нейтронов в широком интервале энергий нейтронов.

Список литературы

[1] Шаманин, И.В. Использование программы ORIGEN-ARP при расчете изотопного состава отработанного топлива реактора ВВЭР-1000 / И.В. Шаманин [и др.] // Известия Томского политехнического

университета [Известия ТПУ]: Энергетика. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 25–28.

[2] Шаманин, И.В. Нуклидная кинетика с участием ядер гафния и гадолиния, находящихся в долгоживущих изомерных состояниях / И.В. Шаманин, М.А. Казарян // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2017. – Т. 44. – № 7. – С. 48–52; DOI 10.3103/S1068335617070077

[3] Ткаля, Е.В. Индуцированный распад ядерного изомера $^{178m2}\text{Hf}$ и «изомерная бомба» / Е.В. Ткаля // Успехи физических наук. – 2005. – Т. 175. – № 5. С. 555–561.

[4] Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных для генерации наборов констант в системе константного обеспечения БНАБ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ultra.ippe.obninsk.ru:8097>. – (Дата обращения: 06.2005).

[5] Audi, G. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties / G. Audi [et al.] // Nuclear Physics A. – 1997. – Vol. 624. – P. 1–124.

References

[1] Shamanin I.V., Bedenko S.V., Pavlyuk A.O., Lyzko V.A. The use of ORIGEN-ARP code for reactor VVER-1000 spent fuel isotopic composition calculation (Ispolzovanie programmi ORIGEN-ARP pri raschete izotopnogo sostava otrabotannogo topliva reaktora VVER-1000). *Bull. Tomsk Polytechnic Univ.*, 2010;317(4):25–28 (in Russ.).

[2] Shamanin I.V., Kazaryan M.A. Nuclide Kinetics Involving Hafnium and Gadolinium Nuclei in Long-Lived Isomeric States. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2017;44(7):215–217 (in Russ.).

[3] Tkalia E.V. Induced decay of nuclear isomer $^{178m2}\text{Hf}$ and “isomeric bomb” (Inducirovanniy raspad yadernogo izomera $^{178m2}\text{Hf}$ i “izomernaya bomba”). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2005;175(5):555–561 (in Russ.).

[4] Evaluated Neutron Data Library Fond-2.2 (Russian library of evaluated neutron data files for constant sets generation in the constant ensuring system BNAP) (Biblioteka Otsenennykh Neytronnykh Dannykh Fond-2.2 (Rossiyskaya biblioteka failov otsenennykh neytronnykh dannykh dlya generatsii naborov constant v sisteme konstantnogo obespecheniya BNAP) [E-resource]. Available on: <http://ultra.ippe.obninsk.ru:8097> (June, 2005) (in Russ.).

[5] Audi G. et al. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics A*, 1997;624:1–124.

Транслитерация по BSI

