

УДК 539.17

## О РЕАКТОРНОЙ НАРАБОТКЕ ИЗОМЕРА $^{178m2}\text{Hf}$

© 2021 г. В. В. Афанасьев<sup>1</sup>, М. О. Громов<sup>1</sup>, А. Л. Ижutow<sup>1</sup>, В. В. Кольцов<sup>2, \*</sup>,  
А. Л. Петелин<sup>1</sup>, В. В. Пименов<sup>1</sup>, С. А. Сазонтов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество “Государственный научный центр –

Научно-исследовательский институт атомных реакторов”, Димитровград, Россия

<sup>2</sup>Акционерное общество “Радиевый институт имени В.Г. Хлопина”, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Исследована наработка изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 31$  год) при облучении в водо-водяном реакторе природного гафния нейтронами с флюенсом  $\sim 10^{22}$  см<sup>-2</sup>. Показано, что в основном изомер  $^{178m2}\text{Hf}$  образуется в реакциях с быстрыми нейтронами на изотопах  $^{178}\text{Hf}$  или  $^{179}\text{Hf}$ . Удельная активность изомера в облученном гафнии около 2 кБк · г<sup>-1</sup>.

DOI: 10.31857/S0367676521100033

### ВВЕДЕНИЕ

Изомер  $^{178m2}\text{Hf}$  с энергией возбуждения 2.5 МэВ имеет период полураспада  $T_{1/2} = 31$  год, спин изомера на 16 единиц больше спина основного состояния ядра  $^{178}\text{Hf}$  [1]. В последнее время этот изомер вызывал большой интерес ввиду перспективы его использования в источнике энергии на основе стимуляции девозбуждения изомера [2, 3]. Возможность такой стимуляции недавно была подтверждена экспериментами с изомером  $^{186m}\text{Re}$  в лазерной плазме [4]. Для создания  $^{178m2}\text{Hf}$  источника энергии необходимо получить изомер в количестве, которое можно оценить из аналогии с обычным топливом. Так, например, для такого же энерговыделения, как и при сжигании одного литра бензина, необходимо  $\sim 10^{20}$  ядер  $^{178m2}\text{Hf}$ . Однако исследованные к настоящему времени способы наработки изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  не дают столько изомерных ядер. Для образования высокоспинового изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  в ядерной реакции с образованием составного ядра необходимо внести большой угловой момент в составное ядро [2]. Ввиду наличия центробежного барьера для таких реакций реагирующие частицы должны иметь большую энергию. Поэтому образование изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  исследовали в реакции  $^{176}\text{Yb}(\alpha, 2n)^{178m2}\text{Hf}$  при облучении мишеней иттербия  $\alpha$ -частицами энергии около 30 МэВ, в реакциях фрагментации при облучении протонами энергии 1 ГэВ мишеней Ta, W, Re и при облучении этих мишеней тормозным излучением энергии до 4.5 ГэВ [2]. Также исследовали образование изомера при облучении Ta мишеней электронами энер-

гии 1.2 ГэВ [5]. Однако каждым из этих способов пока было наработано не более  $10^{15}$  изомерных ядер. В то же время известно, что основной способ наработки больших количеств изотопов – это облучение мишеней нейтронами в атомном реакторе, и важно определить возможность реакторной наработки изомера. Для эффективного образования изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  при радиационном захвате нейтронов, неупругом рассеянии нейтронов или в ( $n, 2n$ ) реакциях нужны нейтроны с энергией около 10 МэВ или более [2]. Таких нейтронов в реакторе мало и поэтому реакторная наработка изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  представляется неперспективной, однако этот вывод нуждается в экспериментальной проверке. Экспериментов по наработке изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  в реакторе было мало, нам известно всего 0 двух таких работах [6, 7].

В работе [6] исследовали образование изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  при радиационном захвате нейтронов ядрами  $^{177}\text{Hf}$ . Мишени гафния с 84% обогащением по изотопу  $^{177}\text{Hf}$  – содержание этого изотопа в природном гафнии 18%, с экспозицией от полугода до двух лет выдерживали в потоке нейтронов  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> реактора на тепловых нейтронах (materials test reactor) Национальной лаборатории в Айдахо, США. Из сравнения активности изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  в мишенях с различной экспозицией облучения нашли, что сечение выгорания изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  менее  $\sigma_{burn, m} = 20$  бн. Из активности изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  в мишени гафния массой 120 мг, которую облучали с набором нейтронного флюенса

$\Phi \sim 10^{22} \text{ см}^{-2}$ , с учетом выгорания  $^{177}\text{Hf}$  и изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ , получили сечение образования изомера  $\sigma_m \approx 0.2 \pm 0.1$  мкбн (здесь и далее погрешность указана на уровне одного стандартного отклонения). При расчете сечения учитывали величину флюенса нейтронов во всем энергетическом диапазоне.

В работе [7] мишень природного гафния облучали в импульсном реакторе на быстрых нейтронах ИБР-2 Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна). Облучательный канал был окружен защитой из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  толщиной 3 мм, которая практически полностью поглощала тепловые нейтроны. Мишень представляла собой цилиндр из металлического гафния диаметром 1 мм. Экспозиция облучения составила 18 дней при потоке нейтронов  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и флюенсе нейтронов  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . Авторы работы [7] считали, что в их эксперименте изомер  $^{178m2}\text{Hf}$  образуется только при радиационном захвате ядрами  $^{177}\text{Hf}$  в основном резонансных нейтронов, хотя правомерность этих двух предположений в работе [7] осталась необоснованной. Величину резонансного интеграла  $I_m = 50$  мкбн при образовании изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  получили, измеряя активность изомера в мишени после облучения и соотнося ее с числом атомов изотопа  $^{177}\text{Hf}$  и флюенсом нейтронов. Исходя из величины  $I_m$  авторы работы [7] получили оценку  $\sigma_m \approx 2.6$  мкбн для сечения радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами  $^{177}\text{Hf}$  с образованием изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ .

Полученное в работе [7] сечение  $\sigma_m$  на порядок величины больше, чем в работе [6]. Хотя в работе [7] ввиду малого нейтронного флюенса выгорание стартовых изотопов и изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  было несущественно, авторы для согласования двух значений сечения  $\sigma_m$  все же обосновывали новую оценку сечения выгорания изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  при радиационном захвате тепловых нейтронов  $\sigma_{burn, m} \approx 235$  бн, что на порядок величины больше, чем в работе [6]. Но возможно, что различие значений сечения образования изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ , полученных в работах [6, 7], вызвано не столько неточным значением использованного там сечения выгорания изомера, сколько различием в спектрах нейтронов, которыми в этих работах облучали мишени гафния, и различием изотопного состава мишеней. Для уточнения механизма образования  $^{178m2}\text{Hf}$  в реакторе в настоящей работе исследовалась наработка изомера при длительном нейтронном облучении природного гафния.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА

Мы исследовали наработку изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  в природном гафнии, облученном потоком нейтро-

нов  $10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  с флюенсом до  $\sim 10^{22} \text{ см}^{-2}$  в бассейновом водо-водяном реакторе РБТ-6 (ГНЦ НИИАР). Использовали часть регулирующего органа в виде пластины металлического гафния 6 мм толщины, описанной в работе [8]. Эта пластина находилась в замедлителе активной зоны реактора в 1993–2002 гг. Эффективное время ее облучения около 2050 сут. Флюенс нейтронов в различных точках гафниевой пластины с точностью до 20% определяли с помощью численной модели, созданной на основе пакета прикладных программ MCU (версия MCU-RR) для моделирования процесса переноса нейтронов методом Монте-Карло [9]. В этой версии программы реализован аналоговый метод Монте-Карло совместного моделирования траекторий нейтронов и  $\gamma$ -квантов в трехмерной геометрии. Ее константное обеспечение базируется на библиотеке ядерных данных DLC/MCUDAT-2.1. Библиотека включает в себя сечения и другие константы взаимодействия нейтронов и гамма-квантов в определенной области энергии с нуклидами, входящими в состав материалов реактора. Сечения взаимодействия нейтронов в диапазоне энергий 1 эВ–10.5 МэВ представлены в 26-групповом формате системы констант БНАБ. Информация о резонансных характеристиках сечений представлена в виде подгрупповых параметров. В тепловой области энергий нейтронов 0–1 эВ сечения представлены в 40-групповом разбиении с равномерным шагом по скорости (библиотека ТЕПКОН). Дифференциальные сечения рассеяния вычислены для заданных температур с учетом химических связей и кристаллической структуры материалов.

Пробы гафния для анализа на  $^{178m2}\text{Hf}$  отбирали в ГНЦ НИИАР в нескольких точках гафниевой пластины. Предварительно дезактивировали поверхность пластины водным раствором щавелевой и фосфорной кислот, затем смесью органических кислот и пропелента. Фрезерным сверлом диаметром 6 мм отбирали поверхностные пробы гафния из слоя глубиной от 0.5 до 0.8 мм. Для глубинных проб отбирали гафний из внутреннего слоя пластины глубиной от 2.0 до 3.0 мм. Такой способ отбора проб позволял выделить вклад тепловых нейтронов в образование изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ . Данные по сечению радиационного захвата нейтронов изотопами гафния [10], концентрация атомов гафния в металле и его изотопный состав дают макроскопическую длину поглощения тепловых нейтронов в природном гафнии  $L_{\text{погл}} = 2.1$  мм. Поэтому тепловые нейтроны в основном поглощались в поверхностном слое гафниевой пластины, откуда брали поверхностные пробы. В глубине гафниевой пластины, откуда брали глубинные пробы, поток тепловых нейтронов был приблизительно на порядок слабее, чем в поверхностном

**Таблица 1.** Удельная активность ( $\text{Бк} \cdot \text{г}^{-1}$ ) поверхностных ( $A_{\text{п}}$ ) и глубинных ( $A_{\text{г}}$ ) проб, приведенная к моменту окончания облучения гафния в реакторе. В погрешность удельных активностей включена только составляющая, связанная с измерением интенсивности линий в  $\gamma$ -спектрах и исключена 6% систематическая погрешность, связанная с определением эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов.  $\Phi_{0-0.625}$ ,  $\Phi_{0.625-5.53}$ ,  $\Phi_{5.5-0.821}$ ,  $\Phi_{0.821-10.5}$  — соответственно флюенсы нейтронов в единицах  $10^{21} \text{ см}^{-2}$  в диапазонах энергии 0–0.625 эВ; 0.625 эВ–5.53 кэВ; 5.53 кэВ–0.821 МэВ; 0.821–10.5 МэВ

Параметр		Точка пробоотбора							
		1	3	2	4	10	5	7	8
$^{178\text{m}}\text{Hf}$	$A_{\text{п}}$	1650 ± 9	2003 ± 9	1970 ± 13	2412 ± 8	2476 ± 13	2642 ± 15	2931 ± 15	2812 ± 15
	$A_{\text{г}}$	1583 ± 8	1905 ± 8	2018 ± 5	2287 ± 9	2352 ± 8	2462 ± 6	2792 ± 11	2769 ± 9
$^{94}\text{Nb}$	$A_{\text{п}}$	165 ± 5	221 ± 5	234 ± 8	239 ± 4	246 ± 6	262 ± 7	288 ± 7	267 ± 6
	$A_{\text{г}}$	137 ± 3	170 ± 3	188 ± 1,7	207 ± 3	222 ± 3	225 ± 2.4	254 ± 4	261 ± 4
$\Phi_{0-0.625}$		4.78	5.50	5.84	6.94	4.80	6.44	7.53	6.84
$\Phi_{0.625-5.53}$		1.03	1.18	1.25	1.48	1.01	1.37	1.60	1.45
$\Phi_{5.53-0.821}$		2.05	2.35	2.51	2.98	2.03	2.76	3.22	2.61
$\Phi_{0.821-10.5}$		1.51	1.75	1.87	2.24	1.51	2.07	2.43	1.95

слое. Макроскопическая длина поглощения нейтронов энергии 10 кэВ в природном гафнии равна  $L_{\text{полг}} = 23$  см, для нейтронов большей энергии еще больше. Поэтому поток быстрых нейтронов был практически одинаков для поверхностных и глубинных проб.

Для определения содержания изомера  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  в облученном гафнии в Радиевом институте измерили удельную активность радионуклидов в пробах гафния методом  $\gamma$ -спектрометрии. Использовали детектор на основе кристалла особо чистого германия с относительной эффективностью в фотопике 25%. Пробы гафния в виде мелкой металлической стружки помещали в одинаковые стеклянные бюксы диаметром 20 мм. Масса каждой из глубинных проб была около 1 г, стружку гафния этих проб равномерно распределяли по всему дну бюкса. Масса каждой из поверхностных проб была около 0.1 г, стружку гафния этих проб равномерно распределяли в пятно диаметром около 10 мм в центре дна бюкса. Бюксы с пробами гафния устанавливали по оси детектора на расстоянии 45 мм от его поверхности. Такая геометрия измерений обеспечивала ничтожный вклад в спектр от суммирования каскадных  $\gamma$ -квантов изомера  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  и сопутствующих квантов рентгеновского излучения, но давала достаточную эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов от мало активных проб.

С момента окончания реакторного облучения гафния до начала измерений прошло 18 лет и в  $\gamma$ -спектрах глубинных проб гафния были видны только линии  $\gamma$ -квантов долгоживущих радионуклидов — в основном самого изомера  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  и изотопа  $^{94}\text{Nb}$  ( $T_{1/2} = 2 \cdot 10^4$  лет), образованного радиационным захватом нейтронов из примесного к гаф-

нию природного изотопа  $^{93}\text{Nb}$ . Активность изомера  $^{178\text{m}2}\text{Hf}$  определяли по интенсивности двух его  $\gamma$ -линий 426 и 574 кэВ, активность  $^{94}\text{Nb}$  определяли по интенсивности его  $\gamma$ -линии 702 кэВ. Эффективность  $\epsilon_{\gamma}$  регистрации  $\gamma$ -квантов определяли с погрешностью менее 6% следующим образом. Образцовый точечный источник  $^{152}\text{Eu}$  помещали на оси детектора в месте установки бюксов с пробами гафния, измеряли  $\epsilon_{\gamma}$  для  $\gamma$ -квантов  $^{152}\text{Eu}$ , затем по экспоненциальной зависимости  $\epsilon_{\gamma}$  от энергии  $\gamma$ -квантов интерполировали ее значения к энергии  $\gamma$ -квантов 426, 574 и 702 кэВ. При смещении источника в сторону от оси на 10 мм величина  $\epsilon_{\gamma}$  менялась меньше чем на 1%. Поглощение  $\gamma$ -квантов в материале проб уменьшало величину  $\epsilon_{\gamma}$  на доли процента для поверхностных проб и на единицы процентов для глубинных проб. Поправку на это поглощение вводили в  $\epsilon_{\gamma}$ , при этом толщину поглощающего материала выбирали равной половине толщины слоя гафния в бюксах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В табл. 1 представлены результаты измерения удельной активности проб и приведены расчетные флюенсы нейтронов четырех диапазонов энергии в точках пробоотбора. Мы стремились точки пробоотбора в столбцах табл. 1 расположить по возрастанию нейтронного флюенса. Поскольку величину флюенса мы рассчитывали с погрешностью 20%, а весь диапазон изменения флюенсов составляет всего 50%, то корректная сортировка точек пробоотбора по расчетному флюенсу оказалась невозможной. Но очевидно, что более точно измеренная удельная активность  $^{94}\text{Nb}$  в глубин-

ных пробах пропорциональна флюенсу нейтронов в точках пробоотбора. Поэтому в табл. 1 для более точной сортировки точек пробоотбора по возрастанию нейтронного флюенса применена их сортировка по возрастанию удельной активности  $^{94}\text{Nb}$  в глубинных пробах, где изотопы Nb меньше выгорали из-за экранировки от тепловых нейтронов.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из табл. 1 видно, что удельная активность  $^{94}\text{Nb}$  поверхностных проб значительно выше, чем глубинных. Это соответствует большому сечению радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами  $^{93}\text{Nb}$ , поток которых был ослаблен для глубинных проб. Наоборот, удельная активность изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  в поверхностных пробах только на несколько процентов больше чем в глубинных. То есть, изотоп  $^{178m2}\text{Hf}$  в основном образуется не за счет реакций с тепловыми нейтронами. Как уже отмечалось, этот вывод соответствует представлению о образовании высокоспинового изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  преимущественно в реакциях именно с быстрыми нейтронами. Значит, при расчете сечения образования изомера неправильно учитывать полный флюенс нейтронов, поскольку в этом случае в основном учитывается флюенс именно тепловых нейтронов. Кроме того, априори неясно, в какой именно нейтронной реакции образуется изотоп  $^{178m2}\text{Hf}$ . В работе [6] в реакторе облучали мишень, сильно обогащенную  $^{177}\text{Hf}$ , и можно было предполагать, что изотоп  $^{178m2}\text{Hf}$  образуется при радиационном захвате нейтронов. Но для работы [7], в которой облучали природный гафний, это предположение уже неочевидно, поскольку изотоп  $^{178m2}\text{Hf}$  в принципе может образовываться и при неупругом рассеянии нейтронов на изотопе  $^{178}\text{Hf}$ , и в  $(n, 2n)$  реакциях на изотопе  $^{179}\text{Hf}$ . Содержание этих изотопов в природной смеси:  $^{177}\text{Hf}$  – 18.6%,  $^{178}\text{Hf}$  – 27.3%,  $^{179}\text{Hf}$  – 13.6%. Однако в работе [7] сечение образования изомера рассчитали именно по реакции радиационного захвата на  $^{177}\text{Hf}$ . Если таким же образом формально допустить, что и в нашей работе весь изотоп  $^{178m2}\text{Hf}$  образовывался захватом нейтронов ядрами  $^{177}\text{Hf}$ , то с учетом выгорания  $^{177}\text{Hf}$  и  $^{178m2}\text{Hf}$  сечение образования изомера  $\sigma_m$  при радиационном захвате нейтронов ядрами  $^{177}\text{Hf}$  можно получить из формулы

$$N_{178,m}(t) = \sigma_m N_{0,177} \Phi e^{-\sigma_{177} \Phi t} \times \frac{e^{(\sigma_{177} - \sigma_{burn,m}) \Phi t} - 1}{(\sigma_{177} - \sigma_{burn,m}) \Phi - \lambda_m t}, \quad (1)$$

где  $N_{178,m}$  – число наработанных ядер изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ ,  $N_{0,177}$  – стартовое число ядер  $^{177}\text{Hf}$ ,  $\sigma_{burn,m}$  –

сечение выгорания для изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ ,  $\sigma_{177} = 365$  барн – сечение выгорания (сечение радиационного захвата нейтрона) для ядра  $^{177}\text{Hf}$ ,  $\lambda_m = 7.1 \cdot 10^{-10} \text{ c}^{-1}$  – постоянная распада изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ ,  $t = 9$  лет – продолжительность облучения. Формула (1) получена из рассмотрения баланса между образованием изомера и его выгоранием, спонтанным распадом изомера и выгоранием стартового изотопа  $^{177}\text{Hf}$ . В расчете сечения  $\sigma_m$  мы учитывали полный флюенс нейтронов  $\Phi$  во всем диапазоне энергий. Поскольку для сечения выгорания изомера  $\sigma_{burn,m}$  в работах [6, 7] приводятся значения, различающиеся между собой на порядок величины, то мы провели расчеты, используя оба эти значения. Для расчета использовали удельную активность поверхностных проб, поскольку именно для этих проб условия облучения были наиболее близкими к условиям облучения в работах [6, 7]. По полученным таким образом значениям сечения для каждой точки пробоотбора из табл. 1 было проведено усреднение, результаты следующие – для сечения выгорания  $\sigma_{burn,m} = 235$  бн [7] сечение образования изомера  $\sigma_m = 18 \pm 4$  мкбн, для  $\sigma_{burn,m} = 20$  бн [6] сечение  $\sigma_m = 2.8 \pm 0.7$  мкбн, для  $\sigma_{burn,m} = 0$  бн [6] сечение  $\sigma_m = 2.3 \pm 0.6$  мкбн. Указанная погрешность рассчитанных сечений в основном определяется 20% погрешностью определения нейтронного флюенса.

При сечении выгорания  $\sigma_{burn,m} < 20$  бн для изомера  $^{178m2}\text{Hf}$ , измеренного в работе [6], рассчитанное нами сечение  $\sigma_m$  в пределах погрешности совпадает с результатом работы [7], в которой также облучали мишень природного гафния, но из-за малого нейтронного флюенса выгорание изотопов при облучении было несущественно. В тоже время наш результат на порядок величины больше сечения  $\sigma_m$ , полученного в работе [6], несмотря на использование одинаковой величины сечения выгорания изомера  $\sigma_{burn,m}$  и приблизительно одинаковый флюенс и спектр нейтронов. Но мы использовали мишень природного гафния, а в работе [6] облучали мишень, сильно обогащенную по  $^{177}\text{Hf}$ . По-видимому, именно это различие привело к различию в величине измеренных сечений. Следовательно, при реакторном облучении мишеней из природного гафния образование изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  намного более вероятно в нейтронных реакциях на изотопах  $^{178}\text{Hf}$  или  $^{179}\text{Hf}$ , чем на изотопе  $^{177}\text{Hf}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что исследованные к настоящему времени реакторные способы наработки изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  для создания энергоблока неперспективны. После облучения природного гафния нейтронным потоком с флюенсом  $\sim 10^{22} \text{ см}^{-2}$  удельная активность изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  около  $2 \text{ кБк} \cdot \text{г}^{-1}$ , и соответственно концен-

трации изомера  $3 \cdot 10^{12}$  ядер  $\cdot \text{г}^{-1}$ . Тогда, например, для наработки  $10^{20}$  ядер изомера — энергия возбуждения такого количества изомеров равна энерговыделению при сжигании 1 л бензина, надо облучить около 30 т гафния, что конечно совершенно нереально. Однако осталось невыясненным, по какой именно нейтронной реакции образуется изотоп  $^{178m2}\text{Hf}$  при облучении в реакторе природного гафния. Возможно, выяснение этого вопроса позволит подобрать режим облучения, дающий более высокий выход изомера. Для дальнейшего исследования механизма образования изомера  $^{178m2}\text{Hf}$  целесообразно в реакторе облучить образцы гафния различного изотопного состава с применением фильтров от тепловых нейтронов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Firestone R.B.* Table of isotopes. Wiley-Interscience, 1996.
2. *Karamian S.A.* // Phys. Part. Nucl. 2008. V. 39. P. 490.
3. *Kirischuk V.I., Ageev V.A., Dovbnaya A.M. et al.* // Phys. Lett. B. 2015. V. 750. P. 89.
4. *Ватулин В.В., Жидков Н.В., Римский-Корсаков А.А. и др.* // Изв. РАН Сер. физ. 2017. Т. 81. № 10. С. 1296; *Vatulin V.V., Jidkov N.V., Rimsky-Korsakov A.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 10. P. 1159.
5. *Kirischuk V.I., Dovbnaya A.M., Kandybei S.S. et al.* // J. Phys. G. 2013. V. 40. P. 1.
6. *Helmer R.G., Reich C.W.* // Nucl. Phys. A. 1973. V. 211. P. 2.
7. *Karamian S.A., Carroll J.J., Adam J. et al.* // High Energy Dens. Phys. 2006. V. 2. P. 48.
8. *Рисованный В.Д., Ключков Е.П., Пономаренко В.Б.* Гафний в ядерной технике. Димитровград: НИИАР, 1993. 143 с.
9. <https://mcproject.ru>.
10. <https://www.nndc.bnl.gov>.

### Production of the $^{178m2}\text{Hf}$ isomer in nuclear reactor

V. V. Afanasiev<sup>a</sup>, M. O. Gromov<sup>a</sup>, A. L. Izhutov<sup>a</sup>, V. V. Koltsov<sup>b,\*</sup>,  
A. L. Petelin<sup>a</sup>, V. V. Pimenov<sup>a</sup>, S. A. Sazontov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad, 433510 Russia

<sup>b</sup>Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg, 194021 Russia

\*e-mail: vladimir-koltsov@yandex.ru

The production of the isomer  $^{178m2}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 31$  years) under irradiation in a water-moderated reactor of natural hafnium with neutrons with a fluence of  $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  was studied. It is shown that the  $^{178m2}\text{Hf}$  isomer is mainly formed in reactions of fast neutrons with the isotopes  $^{178}\text{Hf}$  or  $^{179}\text{Hf}$ . The specific activity of the isomer in irradiated hafnium is about  $2 \text{ kBq} \cdot \text{g}^{-1}$ .