

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЯДЕР ТЯЖЁЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБЛУЧЁННЫХ ПУЧКАМИ ПРОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

HEAVY ELEMENTS NUCLEI FRAGMENTATION IRRADIATED BY HIGH-ENERGY PROTONS

*В. В. Ватулин, А. С. Гнутов, Д. Е. Ларин, М. Ю. Максимов
V. V. Vatulin, A. S. Gnutov, D. E. Larin, M. Yu. Maksimov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В настоящей работе были проведены расчётное и экспериментальное исследования процессов образования радиоактивных изотопов в веществах высоких атомных номеров, подверженных облучению протонами с энергией 50 ГэВ. Были измерены сечения активации исследуемых материалов и проведено сравнение с данными, полученными расчётами методом Монте-Карло.

In the paper processes of radioactive isotopes production in high atomic number materials irradiated by 50 GeV energy protons were investigated by computations and experiment. Activation crossbars of investigated materials were measured and this data was compared with Monte-Carlo estimate.

При решении задач радиационной безопасности на ускорителях протонов высоких энергий возникает необходимость в достоверных оценках наведённой радиоактивности, радионуклидного состава и времени выдержки конструкционных материалов и оборудования, подвергающихся воздействию протонных пучков. Современные программы, рассчитывающие перенос излучения методом Монте-Карло, предлагают эффективные алгоритмы моделирования. Однако естественным образом встаёт вопрос о точности используемых в расчёте значений сечений образования радионуклидов, особенно в области энергий протонов свыше 300 МэВ, где начинают играть роль процессы рождения экзотических адронов и их влияние на протекание ядерных реакций.

В настоящей работе было проведено расчётное и экспериментальное исследование процессов наработки радионуклидов на двух специально разработанных мишенях, схема которых представлена на рис. 1. Мишени представляют собой стопку тонких фольг, изготовленных из исследуемых материалов: вольфрама, тантала и гафния природного изотопного состава. В качестве четвёртого материала был использован рений; по технологическим причинам рений в мишени использовался

в виде порошка, замешанного в расплавленном парафине.

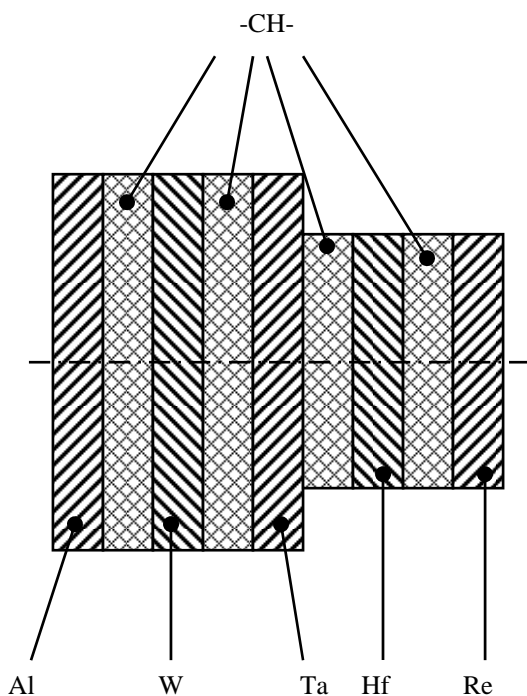


Рис. 1. Схема мишени

Точный массовый состав мишенных сборок приведён в табл. 1.

Таблица 1

Состав мишеней

| Компонент | Толщина, мкм | | Масса, мг | |
|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| | Мишень I | Мишень II | Мишень I | Мишень II |
| Алюминий | 100 | | 356 | 343 |
| Вольфрам | 50 | | 1110 | 1050 |
| Тантал | 100 | 200 | 1890 | 4530 |
| Гафний | 270 | | 2370 | 2330 |
| Рений* | блок ~1000 | | 872 | 952 |

* – металлический рений в виде порошка внесён в расплавленный парафин, парафиновый блок запаян в полиэтилен толщиной 75 мкм

Между пластинами расположены полиэтиленовые прокладки толщиной 180 мкм, служащие для защиты слоя исследуемого материала от осколков ядер, вылетающих с соседнего слоя. Вся сборка помещалась в полиэтиленовый цилиндрический контейнер, заполненный вспененным полиэтиленом. Полиэтилен был выбран специально с целью отсутствия в составе вспомогательных материалов ядер тяжелее углерода.

Мишени были облучены на ускорительном комплексе У-70 (ИФВЭ, г. Протвино). В состав комплекса входят два синхротрона: У-1,5 и собственно У-70. Штатным режимом их работы является ускорение протонов до энергий 1,32 ГэВ и 50 ГэВ соответственно. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведено расположение объекта в облучательном канале синхротрона У-1,5.

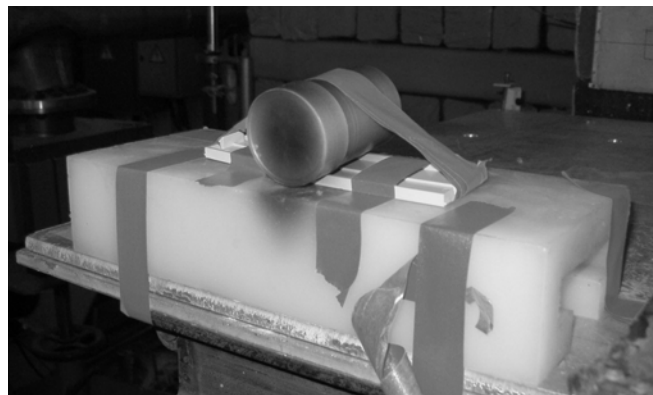


Рис. 2. Мишень в облучательном канале У-1,5

Для определения флюенса упавшего пучка активационным методом в сборку была добавлена алюминиевая фольга. Флюенс определяется по

количеству образовавшихся в алюминии ядер изотопа ^{22}Na , обладающего периодом полураспада 2,6 года и гамма-линией с энергией 1275 кэВ; сечение образование данного изотопа в алюминии природного состава при облучении протонами составляет $(12,0 \pm 0,5)$ мбарн при энергии протонов 1,32 ГэВ и $(10,6 \pm 0,9)$ мбарн – при 50 ГэВ [1].

Облучение изготовленных мишеней было смоделировано в пакете GEANT4.10 [2]. Были рассчитаны таблицы вероятностей образования изотопов и ожидаемые значения активностей мишеней после облучения.

В табл. 2 представлены расчётные зависимости значений активности облучённых мишеней от времени выдержки. Спектр образующихся нуклидов приведён на рис. 3.

Таблица 2

Активности облучённых мишеней, Бк/протон

| Время выдержки, сут | Энергия протонного пучка | |
|---------------------|--------------------------|----------------------|
| | 1,32 ГэВ | 50 ГэВ |
| 0,5 | $5,2 \cdot 10^{-9}$ | $6,7 \cdot 10^{-9}$ |
| 1 | $1,8 \cdot 10^{-9}$ | $3,2 \cdot 10^{-9}$ |
| 10 | $1,1 \cdot 10^{-10}$ | $2,2 \cdot 10^{-10}$ |
| 30 | $4,9 \cdot 10^{-11}$ | $8,0 \cdot 10^{-11}$ |

Сравнение расчётных данных по активности с экспериментальными, полученными специалистами ИФВЭ [3], показывает, что расчёт в пакете GEANT4.10 даёт значения приблизительно на 10 % выше, что важно с точки зрения радиационной безопасности экспериментов.

Оценки энерговыделения в контейнере при облучении протонами с учётом значения пиковой мощности ускорителя дают приблизительно 1 Вт.

По ряду причин к настоящему времени была обмерена только мишень, облучённая пучком протонов с энергией 50 ГэВ. Измерение гамма-спектров проводилось на гамма-спектрометре Spectrum Master 92X фирмы ORTEC с детектором типа EGC 15-200-R фирмы Eurisys Mesures. Энергетическая калибровка гамма-спектрометра и калибровка гамма-спектрометра по абсолютной эффективности регистрации гамма-излучения была проведена с использованием «точечных» образцовых источников гамма-излучения типа ОСГИ – ^{152}Eu и ^{133}Ba [4].

Измеренная активность изотопа ^{22}Na составила $(0,12 \pm 0,01)$ Бк, что даёт, с учётом эффективности регистрации детектора и поправок на время распада, значение количества протонов, упавших на мишень, равное $(2,2 \pm 0,3) \cdot 10^{12}$ частиц.

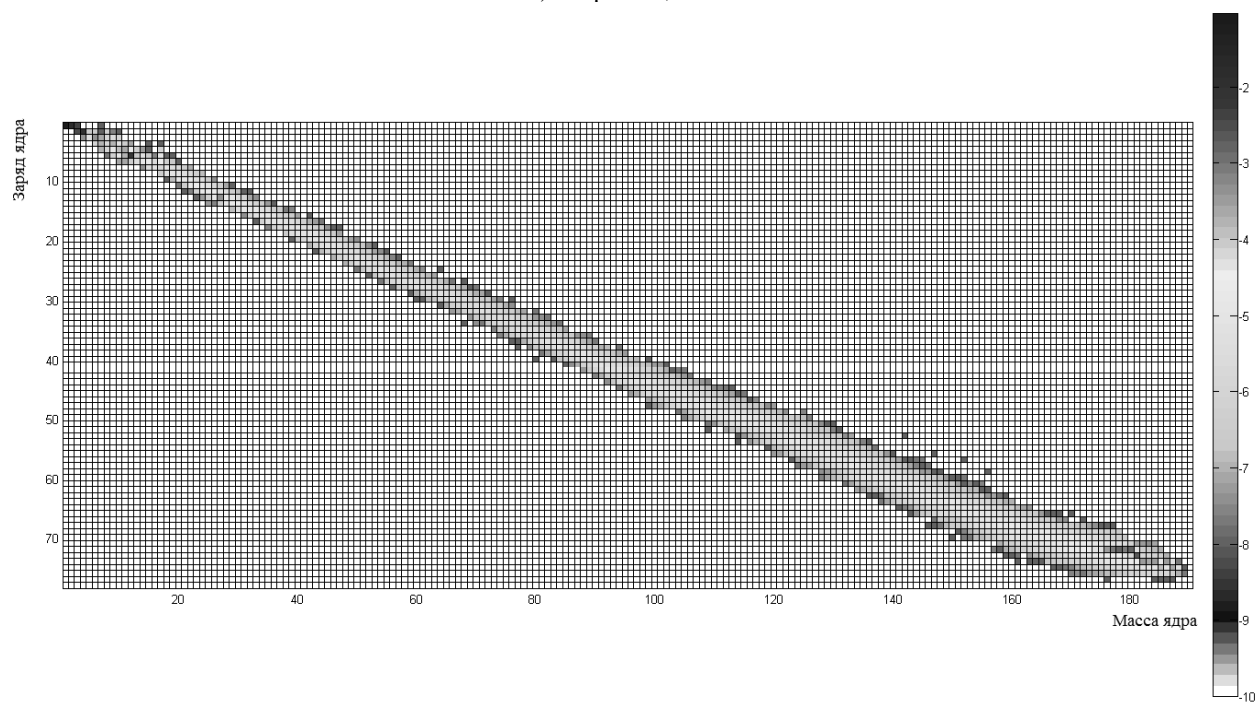
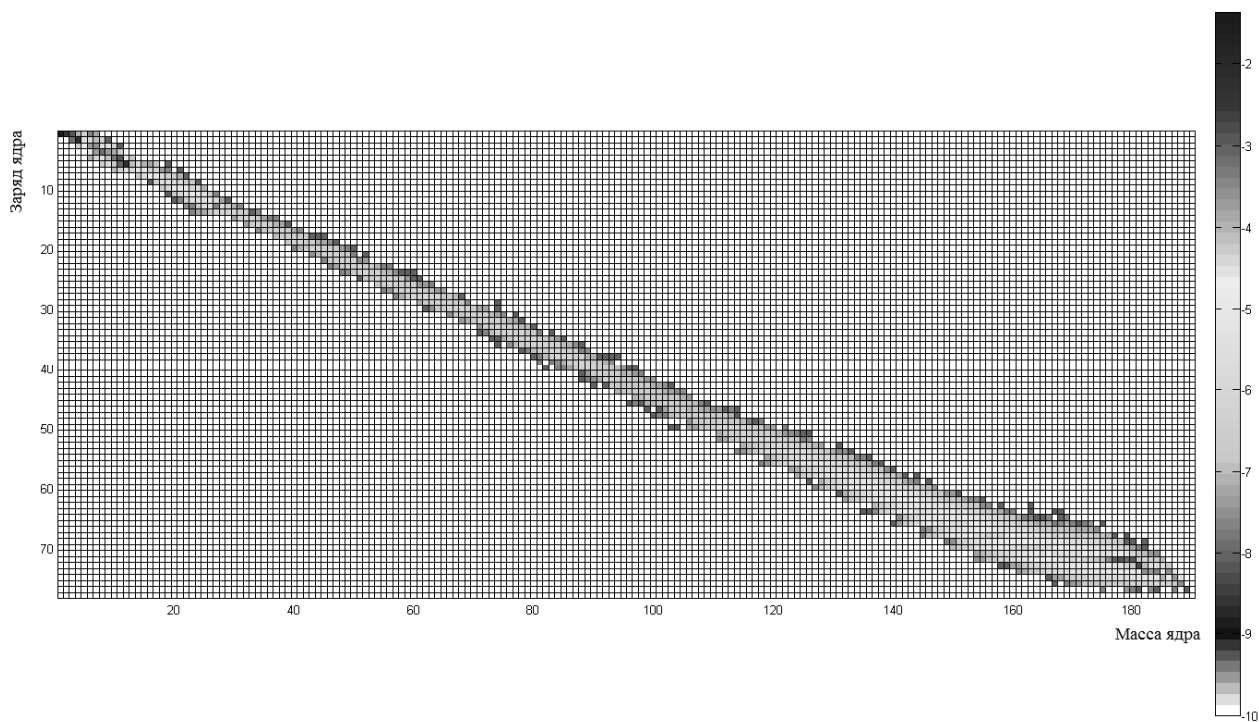


Рис. 3. Массовые спектры образующихся нуклидов при различных энергиях облучающего пучка. Распределение выражено в единицах десятичного логарифма вероятности

В спектрах гамма-излучения образцов вольфрама и рения по энергии гамма-излучения были идентифицированы только фоновые фотопики продуктов распада природных урана-238 и тория-232. В спектрах гамма-излучения образцов тантала и гафния были идентифицированы, кроме

фоновых фотопиков, следующие изотопы: в образце тантала – тантал-182, в образце гафния – гафний-175, гафний-181 и иттербий-169. На рис. 4–5 показаны участки гамма-спектров образцов тантала и гафния.

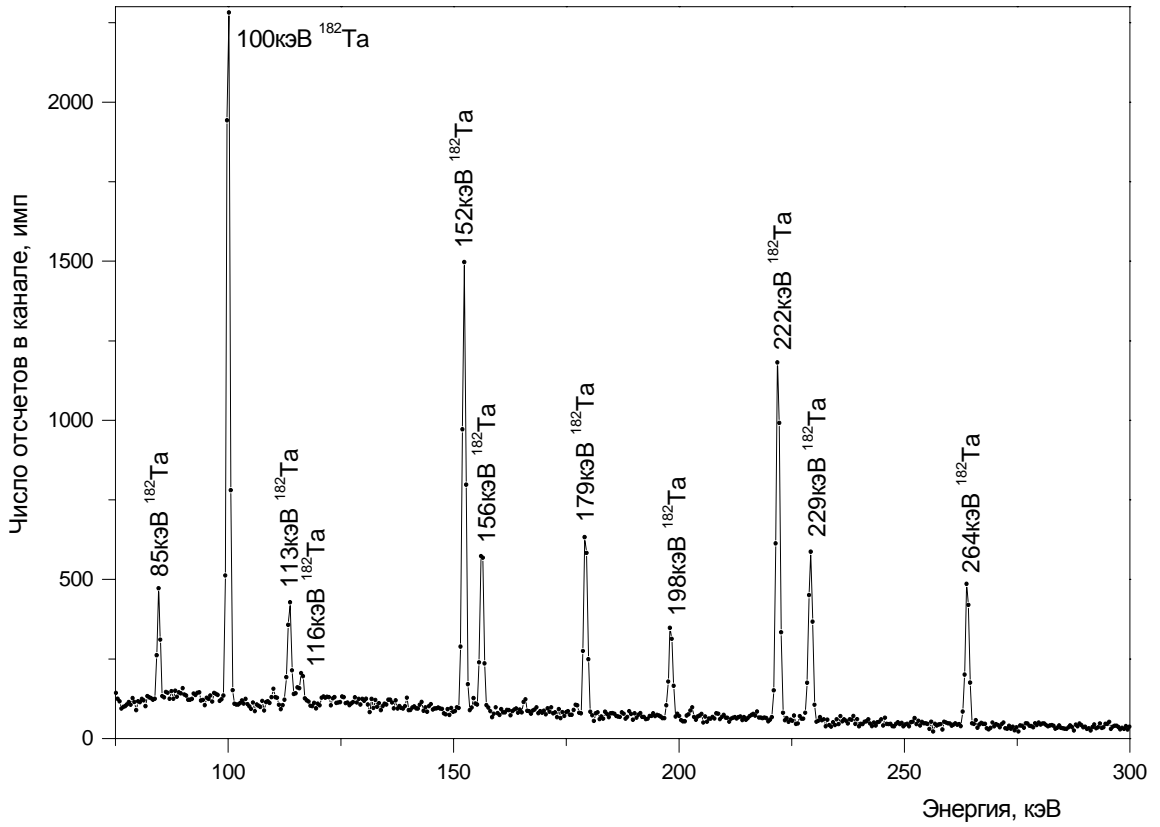


Рис. 4. Участок гамма-спектра образца тантала

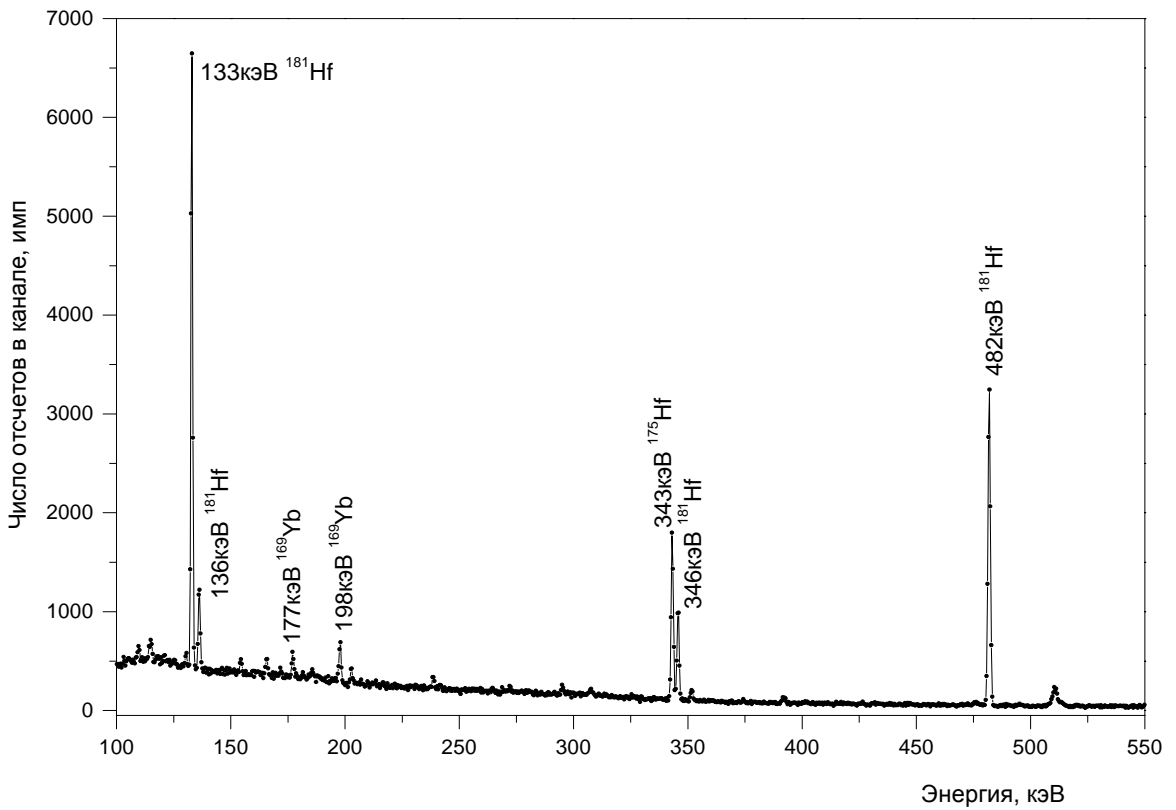


Рис. 5. Участок гамма-спектра образца гафния

Зарегистрированный изотопный состав указывает на подавляющее преобладание процессов нейтронной активации материалов мишени, в меньшей степени – неупругого рассеяния протонов с последующим снятием возбуждения ядра излучением нескольких нейтронов. Высокий поток нейтронов также образуется в реакции фрагментации ядер углерода, входящих в состав упаковки мишени.

В табл. 3 приведено сравнение расчётных экспериментальных значений сечения образования изотопов; экспериментальные данные приведены в пересчёте на момент окончания облучения, и их относительная погрешность оценивается в 50 %.

Таблица 3

Сечения образования изотопов

| Изотоп | Сечение, мбарн | | |
|-------------------|----------------|--|-------------|
| | Расчёт | Расчёт с поправками на цепочки распада | Эксперимент |
| ^{169}Yb | 15,2±0,4 | 51,5±0,7 | 19 |
| ^{175}Hf | 40,3±0,6 | 67,6±0,7 | 76 |
| ^{181}Hf | 42,8±0,6 | | 160 |
| ^{182}Ta | 57,6±0,7 | | 60 |

Помимо прямой фрагментации ядра гафния, ^{169}Yb также образуется за счёт распада по каналам электронного захвата и β^+ -распада по цепочке $^{169}\text{Hf} \rightarrow ^{169}\text{Lu} \rightarrow ^{169}\text{Yb}$. Периоды полураспада ^{169}Hf и ^{169}Lu составляют 3,24 мин и 34 ч соответственно, что даёт возможность полагать указанные изотопы полностью распавшимися за время, прошедшее от конца облучения до начала измерений (0,123 года). Аналогично, ^{175}Hf образуется за счёт β^- -распада ^{175}Ta с периодом полураспада 10,5 ч. В расчёте не были учтены радиоактивные распады образовавшихся ядер в силу громоздкости моделирования в пакете GEANT4.10 процес-

сов, существенным образом зависящих от времени.

Заметное, в разы, расхождение между расчётными и экспериментальными значениями для изотопов ^{169}Yb и ^{181}Hf , по всей видимости, объясняется неучтённым в расчёте воздействием общего нейтронного фона в облучательном канале. Иттербий «выгорает», превращаясь в стабильный ^{170}Yb ; гафний, наоборот, нарабатывается на стабильном ^{180}Hf , входящем в состав мишени. Для остальных двух изотопов наблюдается хорошее совпадение данных.

В целом можно заключить, что модели адронной физики, используемые в пакете GEANT4.10, позволяют с хорошей точностью рассчитывать результаты экспериментов в области высоких (десятки ГэВ) энергий. Стоит отметить, что на тонких мишенях пренебрежимо малы эффекты, связанные с рождением вторичных мезонов и развитием каскадов ядерных реакций, и верификация моделей мезонных процессов требует постановки более сложных и громоздких экспериментов.

Список литературы

1. Бородин В. Е., Крупный Г. И., Зятков О. В. и др. Наведённая радиоактивность конструкционных материалов при развитии межъядерного каскада, инициированного протонами энергией 50 ГэВ. Препринт ГНЦ РФ ИФВЭ 2009-12. Протвино, 2009.

<http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml>

2. Крупный Г. И., Расцветалов Я. Н. Экспериментальная оценка сечений образования нуклидов на меди протонами с энергией 50 ГэВ. Препринт ГНЦ РФ ИФВЭ 2011-28. Протвино, 2011.

3. Свидетельство на комплект образцовых спектрометрических источников гамма-излучения, ОСГИ-3-1р, №1255/05/22000, 2005.