

$$H_{H,j}^{тритий} = Q_H \times \Phi_i \times g_{3,H} \times 10^{-3}, \quad (20)$$

где  $g_{3,H}$  – дозовый коэффициент для  $^3\text{H}$ , (Зв·л)/(Бк·год);

Значения параметров, используемых для определения доз от различных путей облучения населения, устанавливаются на основании региональных натуральных исследований. При отсутствии необходимых сведений допускается использование рекомендованных справочных данных.

Оценка доз облучения выполняется для различных возрастных групп:

- дети до года;
- дети 1-2 года;
- дети 2-7 лет;
- дети 7-12 лет;
- дети 12-17 лет;
- взрослые, старше 17 лет.

На основании оценки годовых эффективных доз по всем путям внешнего и внутреннего облучения при водопользовании может быть установлено репрезентативное лицо, которое наиболее подвержено облучению. Исходя из прогноза годовых эффективных доз облучения репрезентативного лица могут быть обоснованы допустимые сбросы радионуклидов предприятий ЯТЦ.

Таким образом, оценка доз облучения населения, проживающего в районе размещения предприятий ЯТЦ, формируются исходя из технологических процессов, происходящих на предприятиях ЯТЦ, параметров водоема, в который осуществляются сбросы, а также анализа водопользования и жизнедеятельности населения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Курындин, А. В., Строганов, А. А., Шаповалов, А. С., Тимофеев, Н. Б.* Методическое пособие по вопросам регулирования выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. Часть 2. Регулирование сбросов радиоактивных веществ в водные объекты. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2017. – 114с.

2. *Киселев, В. П., Носов, А. В., Крылов, А. Л., Казаков, С. В.* Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 253 с.

3. РБ-126-17 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуются методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) 25 июля 2017 г. № 281. – Москва, Ростехнадзор, 2017.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛЬШОЙ УРАНОВОЙ МИШЕНИ STUDY OF THE NEUTRONICS OF THE BIG URANIUM TARGET

***А. И. Дубровский, А. И. Киевицкая***  
***A. Dubrowski, A. Kiyavitskaya***

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
a1dubrovskii@gmail.com*

*Belarussian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus*

Изучение кинетики подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий, представляет большой интерес для решения проблем, связанных с трансмутацией радиоактивных отходов. В настоящей работе описаны результаты моделирования нейтронно-физических характеристик большой урановой мишени, на которой планируется проведение экспериментальных исследований, нацеленных на выжигание долгоживущих продуктов деления и минор-актинидов.

The study of the kinetics of accelerator-driven subcritical systems is of great interest for solution of the problems related to the transmutation of radioactive waste. It is planned an experimental research aimed at burning of long-lived fission products and minor actinides on the big uranium target. The simulation of its neutronics is described in this paper.

*Ключевые слова:* подкритические системы, управляемые ускорителями; мишень расщепления; нейтронно-физические характеристики; энергетические спектры.

*Keywords:* Accelerator Driven system; spallation target; neutronics; energy spectra.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-344-347>

Для решения проблем обращения с отработавшим ядерным топливом, во всем мире разрабатываются проекты электроядерных подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц высоких энергий (далее—Accelerator Driven System, ADS).

Основная идея ADS состоит в использовании реакции расщепления в тяжелых мишенях под действием пучка высокоэнергетических частиц для производства нейтронов с последующим их размножением в урановом бланкете. На рисунке 1 представлено схематическое изображение такой системы. Прекращение работы ускорителя приводит к обнулению выхода нейтронов из мишени и, как следствие, к практически мгновенному затуханию цепной реакции деления. Такой механизм управления критичностью в силу своей простоты видится перспективным с точки зрения ядерной и радиационной безопасности. Тем не менее, проведение экспериментальных исследований на таких установках требует тщательного планирования и проведения предварительных теоретических расчетов для обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Как правило, для этого используются современные программы, основанные на методе Монте-Карло.

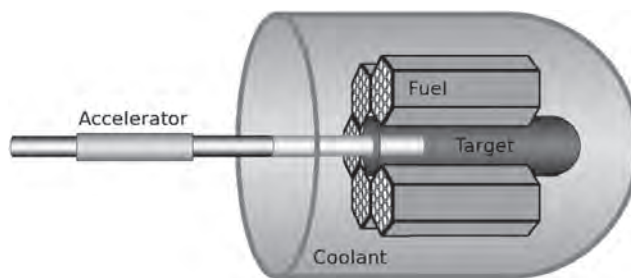


Рисунок 1 – Схематическое изображение ADS

В Объединенном институте ядерных исследований (далее—ОИЯИ) (г.Дубна, Россия) планируется проведение экспериментальных исследований на большой урановой мишени, облучаемой пучками высокоэнергетических протонов [1]. В настоящей работе представлены предварительные расчеты ее нейтронно-физических характеристик.

Разработанная ранее упрощенная модель большой урановой мишени [2] была детализирована и оптимизирована для выполнения расчетов нейтронно-физических характеристик. Схематически установка представляет собой цилиндрический урановый бланкет с внешним диаметром 120 см и высотой 100 см, по оси которого проходит сквозной канал диаметром 6 см на глубину 40 см от переднего торца – для пучка частиц и на оставшиеся 60 см диаметром 20 см – для вставки мишени расщепления из различных материалов. Бланкет состоит из обедненного металлического урана с содержанием 0.4%  $^{235}\text{U}$  и 99.6%  $^{238}\text{U}$ .

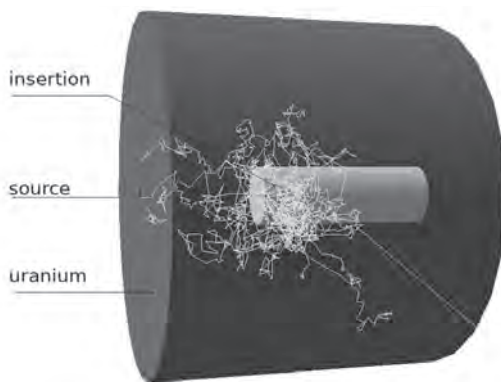


Рисунок 2 – Модель большой урановой мишени

Расчеты выполнялись с использованием кода Geant4 версии 10.5 на четырехъядерном процессоре Intel Core i7-6700 с тактовой частотой 3.4 ГГц и 8 Гб оперативной памяти в многопоточном режиме.

Предварительно были выполнены расчеты интегрального выхода нейтронов и спектральных характеристик частиц, выходящих из различных мишеней расщепления при их облучении пучком протонов высоких энергий. Результаты моделирования показали хорошую сходимость (в пределах 10%) с экспериментальными данными. На рисунке 3 представлены энергетические спектры образующихся и выходящих из мишени нейтронов, для свинцовой мишени 40 x 60 см.

Также были получены энергетические спектры нейтронов, протонов и гамма-квантов, выходящих из свинцовой 10.2 x 60.02 см и вольфрамовой 10.2 x 40 см мишеней при их облучении протонами с энергиями от 0.8 до 1.4 ГэВ. Из рисунков 3, 4 видно, что с ростом энергии протонов форма спектров практически не изменяется, возрастает лишь среднее число взаимодействий и суммарный выход вторичных частиц.

Проведены расчеты скоростей реакций, протекающих в большой урановой мишени облучаемой пучком протонов с энергией 2ГэВ. Использовались две стандартные физические модели, наиболее подходящие для моделирования ADS: Binary Intranuclear Cascade (QGSP\_BIC\_HP) и Intra-Nuclear Cascade Liège (QGSP\_INCLXX\_HP) в связке

с альтернативной испарительной моделью ABLA [3]. Отметим, что время расчета по модели INCLABLA примерно вдвое ниже по сравнению с моделью BIC.

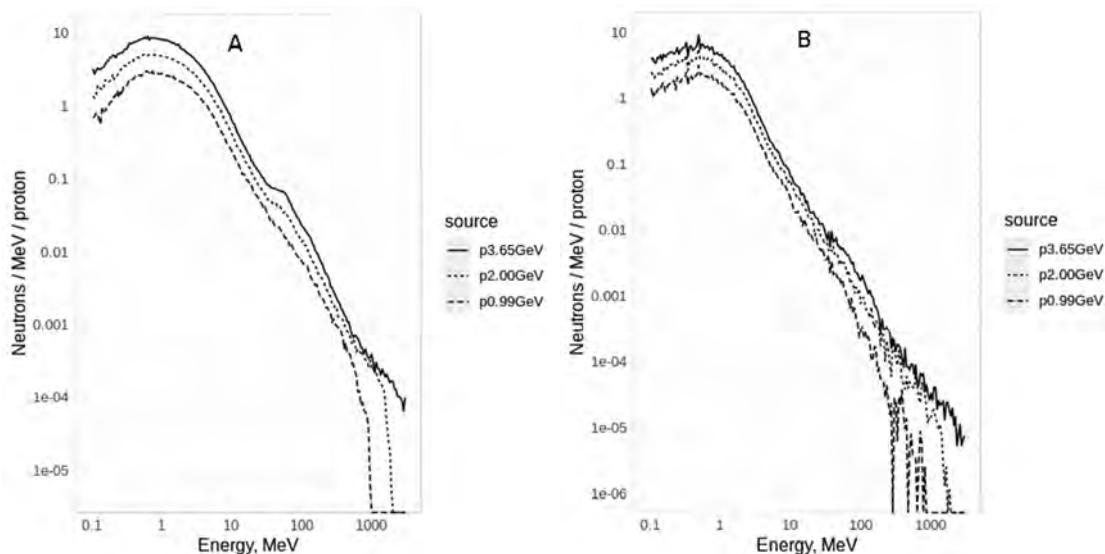


Рисунок 3 – Энергетические спектры образующихся (А) и выходящих (В) из свинцовой мишени нейтронов

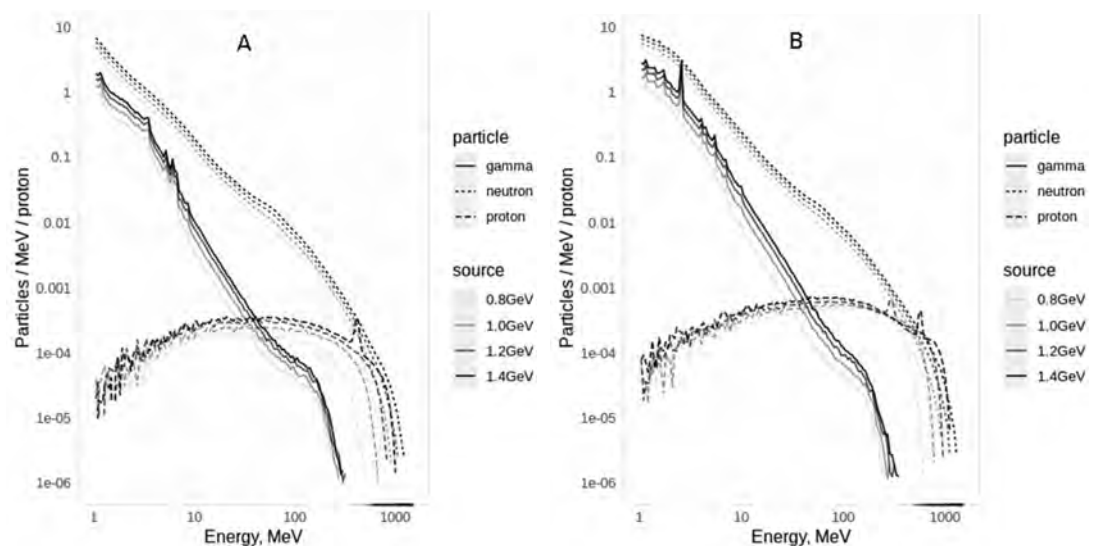


Рисунок 4 – Энергетические спектры вторичных частиц, выходящих из вольфрамовой (А) и свинцовой (В) мишеней

Проведенные расчеты показали, что количественно в системе преобладают ионизационные и упругие взаимодействия. Однако куда больший интерес представляют дискретные процессы, список которых представлен в таблице. Данные приведены в расчете на одну частицу источника, разыграно  $10^4$  историй, статистическая погрешность не превышает 2%.

По сравнению с висмутом, атомная плотность свинца на 17% выше, но при этом сечение реакции (p,fission) на 50% меньше. Тем не менее, нейтронный выход из свинцовой вставки без бланкета примерно на 10% выше, так как высокоэнергетические деления в тяжелых мишенях существенного влияния на образование нейтронов не оказывают. При этом энергетические спектры нейтронов испущенных в большой урановой мишени для Рb- и Вi- вставок практически совпали по форме и площади, потому что описанные выше эффекты теряются на фоне большого количества вторичных нейтронов деления.

Необходимо подчеркнуть, что бериллиевая вставка при меньшей плотности и Z по сравнению с алюминиевой, дает на 6% больший выход нейтронов в бланкете, за счет реакций (n,2n) и более эффективной термализации вторичных нейтронов и, как следствие, более интенсивного деления ядер урана.

Наблюдается на 25-40% больше неупругих рассеяний протонов в системе с железной вставкой по сравнению с остальными мишенями. Возможно, это происходит за счет реакций  $^{56}\text{Fe}(p,np)$  и  $^{56}\text{Fe}(n,xp)$ .

Планируется проведение исследований энерговыделения и скорости наработки продуктов реакций деления в подкритической системе. Результаты моделирования будут использованы для планирования и обоснования ядерной и радиационной безопасности экспериментальных исследований на большой урановой мишени в ОИЯИ (проект БУРАН).

Таблица –Выход нейтронов и список процессов, протекающих в большой урановой мишени

Материал вставки		Be	Al	Fe	Pb	Bi	Th	U
Атомный номер, Z		4	13	26	82	83	90	92
Плотность, г/см <sup>3</sup>		1.848	2.699	7.874	11.35	9.747	11.72	18.95
Выход нейтронов, п/р	INCLABLA	29.659	29.577	37.961	76.764	75.859	91.975	136.187
	BIC	35.491	33.458	41.263	76.353	75.680	92.596	144.824
Число реакций захвата нейтронов	INCLABLA	32.770	33.579	49.653	95.368	91.533	118.473	159.851
	BIC	36.925	35.743	51.768	94.322	90.501	117.983	167.149
Число реакций деления	INCLABLA	7.416	6.779	8.652	16.135	16.065	18.592	32.414
	BIC	9.001	7.955	10.040	17.106	17.043	19.760	35.822
Число неупругих взаимодействий нейтронов	INCLABLA	160.039	192.837	291.042	550.174	532.979	662.933	903.639
	BIC	183.370	208.952	308.362	555.600	536.053	670.645	954.061
Число неупругих взаимодействий протонов	INCLABLA	1.568	1.601	2.176	1.774	1.727	1.728	1.798
	BIC	1.567	1.629	2.225	1.758	1.713	1.716	1.774
Время моделирования, min	INCLABLA	11.15	8.70	13.43	23.977	22.61	25.07	37.99

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин, А.А. Моделирование генерации нейтронов в мишенях из тяжелых металлов при помощи программного пакета Geant4 / Балдин А.А. Берлеев А.И., Кудашкин И.В., Могилдея Г., Могилдея М., Параипан М., Тютюнников С.И. //Письма в ЭЧАЯ. – 2016.– Т.13, № 2 (200) . – С. 391 - 402.
2. Dubrouskia, A. I. Simulation of Neutronics of an Accelerator Driven System / Dubrouski A. I., Kiyavitskaya A. I. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, Vol. 17, No. 1. – P. 19 – 26.
3. Geant4 Collaboration Physics Reference Manual. Release 10.6 [El. resource] – Mode of access: [https://geant4.web.cern.ch/support/user\\_documentation](https://geant4.web.cern.ch/support/user_documentation) – Date of access: 01.03.2020.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА ФИЛЬТРА CUT-OFF НА ПОЛУКОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И КАЧЕСТВО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПЭТ ИЗОБРАЖЕНИЯ EFFECT OF THE CUT-OFF FILTER PARAMETER ON SEMI-QUANTITATIVE VALUES AND QUALITY OF THE DIAGNOSTIC PET IMAGE

**Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин**  
**E. Emelyanenko, I. Tarutin**

*РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова, аг. Лесной, Минский район, Минская область,  
Республика Беларусь  
zheka – ava @ mail.ru  
Alexandrov National Cancer Center of Belarus, 223040, Lesnoy district, Minsk region*

Произведена оценка влияния коэффициента фильтра CUT-OFF на полуколичественные характеристики диагностического ПЭТ изображения, а именно стандартизированный показатель накопления и объем патологического очага. Также получены модели, использование которых позволяет получить предварительную оценку смещения шума и контраста изображения.

The effect of the filter coefficient CUT-OFF on the semi-quantitative characteristics of the diagnostic PET image was evaluated, namely, the standardized accumulation rate and the volume of the pathological focus. Also, obtained models, which use allows you to get preliminary estimate of the noise offset and image contrast.

*Ключевые слова:* шум, контраст, томограф, патология, очаг.

*Keywords:* noise, contrast, tomograph, pathology, focus.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2020-1-347-350>