

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕЙТРОНПРОИЗВОДЯЩИХ МИШЕНЕЙ И УРАН-СВИНЦОВОЙ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

**SIMULATION OF NEUTRONICS OF NEUTRON-PRODUCING
TARGETS AND URANIUM-LEAD SUBCRITICAL ASSEMBLY**

B. B. Кумас^{1,2}, A. I. Киевицкая^{1,2}

V. V. Kutas^{1,2}, A. I. Kiyavitskaya^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

*²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
nrs@iseu.by, vladislavkutas@mail.ru*

¹Belarusian State University, BSU

*²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus*

Стремительный рост ядерных мощностей требует разработки новых стратегий обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является использование подкритических систем, управляемых ускорителем высокогенеретических заряженных частиц (ADS). Моделирование и исследование характеристик ядерных процессов в ADS-установках представляет собой сложную и крайне актуальную задачу.

The rapid growth of nuclear capacity requires the development of new strategies for the management of radioactive waste and spent nuclear fuel. One promising way to solve this problem is to use accelerator driven systems (ADS). Modeling and studying the characteristics of nuclear processes in the ADS-installations is a complex and extremely urgent task.

Ключевые слова: подкритическая сборка, нейтронпроизводящая мишень, ADS-установка, моделирование методом Монте-Карло.

Keywords: subcritical assembly, neutron-producing target, ADS-installation, Monte-Carlo modeling.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-237-240>

Процессы образования нейтронов в реакциях расщепления материалов высокогенеретическими пучками заряженных частиц нашли свое практическое применение в системах, управляемых ускорителем частиц, или ADS (англ. Accelerator Driven Systems) – инновационных ядерных системах, работа которых направлена в основном на трансмутацию долгоживущих радионуклидов. Чаще всего ADS включают в себя протонные ускорители с энергией около 1 ГэВ. ADS-установки имеют ряд преимуществ:

- возможность эксплуатации активной зоны с эффективным коэффициентом размножения нейтронов $k_{\text{эфф}} < 1$ открывает концептуальную возможность создания нового типа реакторов;
- они частично открывают возможность проектирования чистых дожигателей трансурановых элементов и минорных актинидов, минимизируя долю использования подобных технологий в реакторных установках;
- пропорциональность мощности ADS-установки мощности внешнего ускорителя значительно упрощает управление и обеспечивает безопасность такого рода системы: затухание цепной реакции деления в условиях отключения ускорителя заряженных частиц обеспечивает быстрый переход системы в глубоко подкритическое состояние ($k_{\text{эфф}} \ll 1$);
- запас реактивности на мгновенную критичность может быть увеличен без увеличения доли замедленных нейтронов.

Моделирование производилось в программном пакете GEANT4 методом Монте-Карло для двух геометрий исследуемой системы:

- малой цилиндрической нейтронпроизводящей мишени, выполненной в форме цилиндра с высотой 61 см и диаметром 10,2 см;
- уран-свинцовой подкритической сборки (Рис. 1 и 2) в состав которой входит цилиндрическая свинцовая вставка (мишень), исполненная в виде цилиндра диаметром 20 см и высотой 60 см, расположенная внутри урановой цилиндрической оболочки диаметром 120 см и высотой 100 см. Урановая оболочка имеет два цилиндрических отверстия: диаметром 6 см на первые 40 см высоты уранового цилиндра для ввода пучка протонов и диаметром 20 см на оставшиеся 60 см высоты уранового цилиндра для вставки мишени.

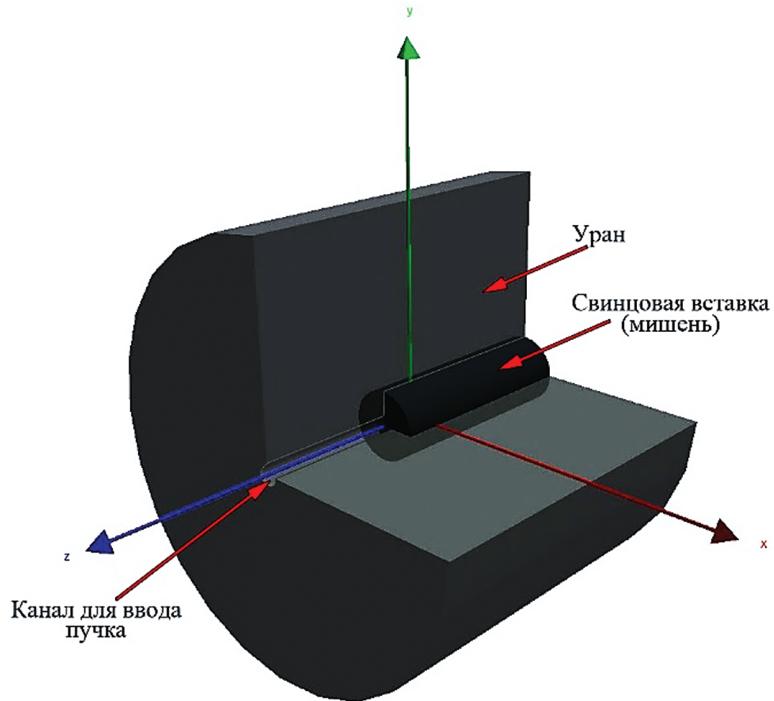


Рисунок 1 – Визуализация геометрии системы в секторальном сечении урановой оболочки

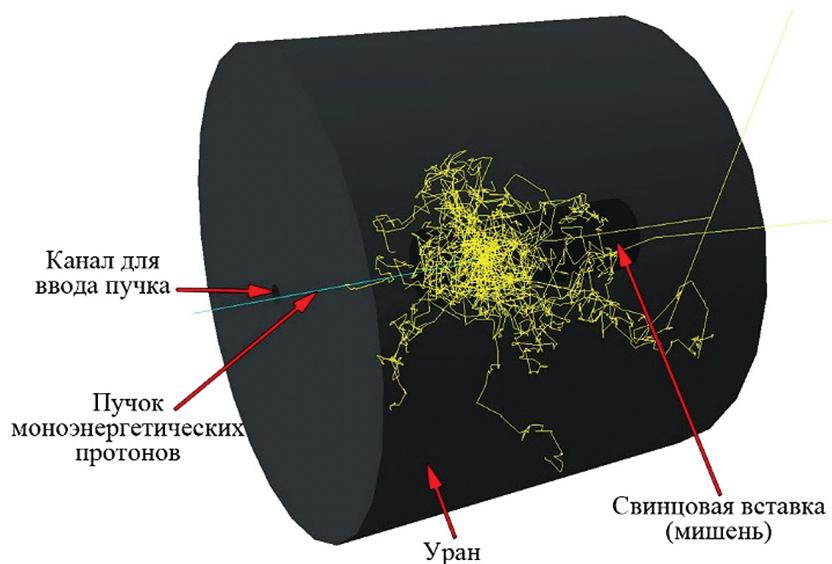


Рисунок 2. – Визуализация треков нейтронов, рожденных в уран-свинцовой сборке при облучении пучком моноэнергетических протонов

Данные по выходам нейтронов из малой свинцовой мишени моделировались для пучков моноэнергетических протонов с энергиями в интервале 0,8–1,4 ГэВ с шагом 0,2 ГэВ. В ходе моделирования было разыграно 10^4 первичных событий. При выполнении расчетов использовался список физики Intra Nuclear Cascade Liège (QGSP_INCLXX_HP) с моделью испарения ABLA (INCL/ABLA). Результаты данного моделирования представлены в последнем столбце таблицы 1.

Сравнение результатов моделирования выхода нейтронов с помощью GEANT4 (список физики INCL/ABLA) с результатами эксперимента Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL) [1] и другими работами (SONET [2], MCNPX [3], GEANT4 [4]) представлено в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показал, что:

- различие полученных данных и данных эксперимента BNL не превышает 16,65 %;
- различие полученных данных и данных по коду SONET и MCNPX не превышает 19,97 % и 9,97 % соответственно;
- различие полученных данных и данных по коду GEANT4 со списками физики BIC и BERT не превышает 9,62% и 9,11% соответственно.

Таблица 1 – Экспериментальные и смоделированные данные по выходам нейтронов из малой свинцовой цилиндрической мишени (высотой 61 см и диаметром 10,2 см), облучаемой пучком высокoenергетических протонов

Энергия протонов, ГэВ	Выход нейтронов из свинцовой мишени на один протон, n/p					
	Эксперимент BNL [1]	SONET [2]	MCNPX [3]	GEANT4 (BIC) [4]	GEANT4 (BERT) [4]	Результаты моделирования
0,8	$13,60 \pm 0,23$	$15,00 \pm 0,35$	$14,45 \pm 0,20$	14,678	16,673	$15,76 \pm 0,16$
1,0	$17,38 \pm 0,23$	$16,90 \pm 0,35$	$18,64 \pm 0,20$	18,484	21,762	$20,27 \pm 0,20$
1,2	$22,31 \pm 0,31$	$23,30 \pm 0,40$	$23,20 \pm 0,20$	21,890	26,148	$23,99 \pm 0,23$
1,4	$26,21 \pm 0,42$	$26,10 \pm 0,30$	$27,09 \pm 0,30$	25,012	30,068	$27,33 \pm 0,26$

Далее был произведен расчет выхода нейтронов из малой мишени (высотой 61 см и диаметром 10,2 см), облучаемой пучком моноэнергетических протонов с энергией 0,8 ГэВ, для материалов различной атомной массы и плотности. В моделировании использовались мишени из лития, бериллия, железа, циркония, вольфрама и свинца. Полученные результаты представлены на рисунках 3 и 4.

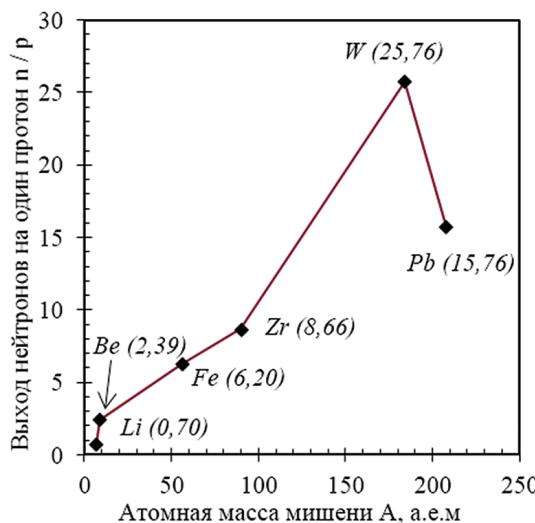


Рисунок 3 – Зависимость интегрального выхода нейтронов на один протон от атомного номера материала мишени (цилиндр высотой 61 см и диаметром 10,2 см; энергия протонов в пучке 0,8 ГэВ)

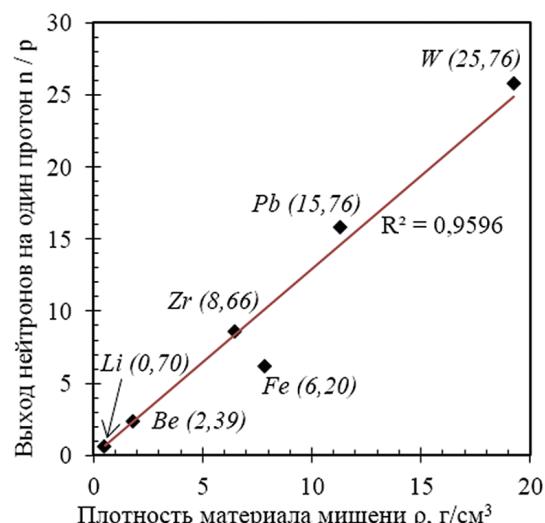


Рисунок 4 – Зависимость интегрального выхода нейтронов на один протон от плотности материала мишени (цилиндр высотой 61 см и диаметром 10,2 см; энергия протонов в пучке 0,8 ГэВ)

Среди рассмотренных материалов наибольшим выходом нейтронов обладает вольфрам, что делает его хорошим нейтронпроизводящим источником для использования в подобного рода системах. Также было обнаружено, что выход нейтронов линейно возрастает с увеличением плотности материала облучаемой мишени, коэффициент достоверности линейной аппроксимации составил 0,9596.

На рисунке 5 представлены спектры нейтронов, образованных в уран-свинцовой подкритической сборке при различных обогащениях урановой оболочки – природного, обедненного (0,4% U-235) и обогащенного (4,7 % U-235). Полученные спектры показывают, что выход нейтронов в диапазоне до 20 МэВ больше у более обогащенного урана. Данный факт связан с большей долей изотопа ^{235}U , который имеет более высокое сечение деления в этой области.

На рисунке 6 представлены спектры нейтронов, образованных в уран-свинцовой сборке для различных типов заряженных частиц в пучке. Использовались пучки, состоящие из протонов, дейtronов, тритонов и α -частиц с удельной кинетической энергией 0,8 ГэВ/нуклон.

Анализируя рисунок 6, можно отметить, что форма спектра нейтронов слабо зависит от типа налетающих частиц, изменяется лишь его высота. Более высокая эффективность пучков заряженных частиц, состоящих из более тяжелых ядер обусловлена тем, что при одной и той же удельной кинетической энергии (ГэВ/нуклон) более тяжелые ядра имеют в своем составе большее число нейтронов, кулоновский барьер для которых отсутствует.

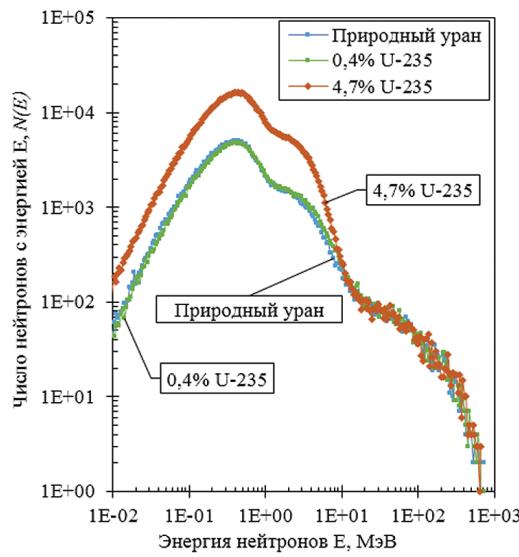


Рисунок 5. Зависимость интегрального выхода нейтронов в уран-свинцовой подкритической сборке от обогащения урановой оболочки (энергия протонов в пучке 0,8 ГэВ)

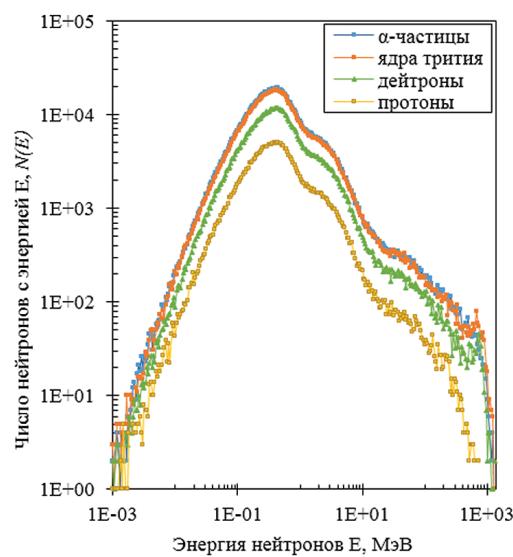


Рисунок 6. Зависимость интегрального выхода нейтронов интегрального выхода нейтронов в уран-свинцовой подкритической сборке от типа частиц в пучке (энергия частиц в пучке 0,8 ГэВ/нуклон)

Эксплуатация ADS-установок позволит частично решить вопросы обращения с образующимися в ходе деятельности предприятий ядерного топливного цикла долгоживущих радиоактивных отходов, что является крайне актуальной задачей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zucker, M. Spallation neutron production measurements / M. Zucker // Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications (ADTTA). – Sweden, 1996. – P. 527–533.
2. Kiyasvitskaya, A.I. Accelerator molten salt breeder as fissile producing component of THORIUM-NES concept for energy production and transmutation of plutonium / A. Kiyasvitskaya, S. Chigrinov, I. Rakhno // Proceedings of the 8th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems ICENES'96. – Obninsk, 1996. – P. 564–571.
3. Goorley, T. MCNP Monte Carlo Team, X-5. Release of MCNP5_RSICC_1.30. Report LA-UR-04-8086 / T. Goorley [et al.] // Los Alamos National Laboratory. – Los Alamos, 1997. – 26 p.
4. Dubrouski, A.I. Simulation of an Accelerator Driven System with Different Spallation Targets / A.I. Dubrouski, A.I. Kiyavitskaya, S.I. Tyutyunnikov // Physics of Particles and Nuclei Letters. – Road Town, 2021. – P. 27–35.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИЙ ИСКЛЮЧЕНИЯ, ИЗЬЯТИЯ И ОСВОБОЖДЕНИЯ ОТ КОНТРОЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

APPLICATION OF THE CONCEPT OF EXCLUSION, EXEMPTION AND CLEARANCE OF SOURCES OF IONIZING RADIATION

E. Л. Никитин^{1,2}, Н. Н. Тушин^{1,2}

E. Nikitin^{1,2}, N. Tushin^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
egor_nikitin_borland_1712@mail.ru, tushin@iseu.by

¹Belarusian State University, BSU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU,
Minsk, Republic of Belarus

Статья описывает применение концепций исключения, изъятия и освобождения от контроля источников ионизирующего излучения. Рассматриваются теоретические основы данных концепций, международный опыт применения.