

СРАВНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК U/Pb ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ, ОБЛУЧАЕМОЙ ДЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1,6; 2,52 и 4 ГэВ

В.А. Воронко¹, В.В. Сотников¹, М.Ю. Артюшенко¹, Ю.Т. Петрусенко¹, И.В. Жук², А.С. Потапенко², А.А. Сафронова², М.Г. Кадыков³, С.И. Тютюнников³, В.В. Чилап⁴, А.В. Чиненов⁴

¹ *ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;*

² *Объединенный институт энергетических и ядерных исследований, Минск, Беларусь;*

³ *Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия;*

⁴ *ЗАО Центр физико-технических проектов «Атомэнергомаш», Москва, Россия*

E-mail: voronko@kipt.kharkov.ua

Представлены первые результаты исследования процессов генерации нейтронов в уран-свинцовой подкритической сборке, облучаемой релятивистскими дейтронами с энергией 4 ГэВ. Получены радиальные и аксиальные распределения числа реакций радиационного захвата и числа делений ^{238}U , а также спектрального индекса $\bar{\sigma}_{\text{capt}}^{238\text{U}} / \bar{\sigma}_f^{238\text{U}}$ в объеме свинцовой мишени и уранового бланкета. Определено полное количество нарабатываемого в урановом бланкете ^{239}Pu и полное число делений ^{238}U . Выполнено сравнение нейтронно-физических характеристик U/Pb подкритической сборки относительно энергии первичного пучка дейтронов (1,6; 2,52 и 4 ГэВ). Проведено сравнение между экспериментальными данными и расчетами, выполненными с использованием программы FLUKA2008.

ВВЕДЕНИЕ

Работа ядерного реактора в подкритическом режиме является одним из вариантов безопасной энергетики. В этом случае требуется облучение реактора дополнительным потоком нейтронов. Эти нейтроны могут быть получены с помощью интенсивных пучков релятивистских протонов или более тяжелых ядер. В последние годы работа в этом направлении значительно активизировалась как в области фундаментальных исследований, так и в разработке конкретных проектов установок, производящих энергию. В настоящей статье описываются эксперименты, которые являются частью научной программы «Исследования физических аспектов электроядерного способа производства энергии и трансмутации радиоактивных отходов с помощью пучков ускорителя «Нуклотрон» ОИЯИ, Дубна, Россия». Приведены первые результаты эксперимента, в котором протяженная уран-свинцовая сборка облучалась пучком дейтронов с энергией 4 ГэВ. Информация о пространственном и энергетическом распределении нейтронов в объеме сборки была получена с помощью активационных и трековых детекторов. Результаты облучения сборки дейтронами с энергией 1,6 и 2,52 ГэВ опубликованы в работах [1-2]. Цели данной работы следующие:

1. Измерить наработку ^{239}Pu в бланкете уран-свинцовой подкритической сборки.
2. С помощью комбинированной треково-гамма-спектрометрической методики получить пространственное распределение в U/Pb-сборке:
 - реакций радиационного захвата ^{238}U нейтронов;
 - реакций деления ^{238}U ;
 - спектрального индекса (отношения среднего сечения захвата к среднему сечению деления ^{238}U).

3. Провести сравнение между экспериментальными данными и расчетами, выполненными с использованием программы FLUKA2008 [3].

4. Провести сравнение полученных нейтронно-физических характеристик U/Pb подкритической сборки относительно энергии первичного пучка дейтронов (1,6; 2,52 и 4 ГэВ).

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

U/Pb-сборка (Pb-мишень: диаметр 8,4 см, длина 45,6 см, окруженная ^{nat}U -бланкетом – 206,4 кг) показана на Рис.1. В целях радиационной безопасности сборка помещалась в контейнер с защитой-замедлителем, состоящим из гранулированного полиэтилена с добавкой карбида бора и стенок из свинца и листового кадмия.

Измерительные сенсоры располагались на пяти детекторных пластинах ($Z=0, 118, 236, 354$ и 472 мм от торца мишени), которые показаны на Рис.1. При этом на каждой пластине имелось по 6 позиций, расположенных на разных расстояниях от продольной оси симметрии мишени. Позиция 1 располага-

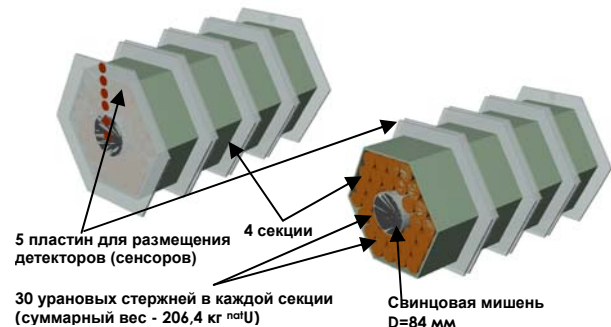
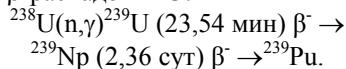


Рис.1. U/Pb-сборка. Свинцовая мишень ($D=8,4$ см, $L=45,6$ см), окруженная бланкетом из природного урана ($m=206,4$ кг)

лась на оси свинцовой мишени $R=0$. Позиция 2 располагалась на расстоянии $R=30$ мм от оси мишени, позиция 3 – на расстоянии $R=60$ мм, позиция 4 – на расстоянии $R=85$ мм, позиция 5 – на расстоянии $R=110$ мм, позиция 6 – на расстоянии $R=135$ мм. Позиции 1 и 2 находились внутри свинцовой мишени, позиции 3, 4 и 5 – внутри уранового бланкета, а позиция 6 – вне бланкета. Сенсоры состояли из радиатора (урановые и свинцовые фольги) в плотном контакте с твердотельными трековыми детекторами ядер (ТТДя). Таким образом, фольги одновременно служили радиатором для ТТДя и активационным детектором. В качестве ТТДя использовалась искусственная слюда МСА (фторфлогопит). Данный тип трекового детектора имеет высокую эффективность регистрации осколков деления и позволяет исключить фон от ядер отдачи при экспозиции в полях нейтронов с жестким спектром.

ТТДя были использованы для получения пространственного распределения числа реакций деления ^{238}U и ^{235}U в У/Pb-сборке. После экспонирования ТТДя протравливались в 6,8 % растворе HF при температуре 60°C в течение 10...45 мин в зависимости от плотности зарегистрированных на детекторе треков. После травления производился визуальный счет треков при помощи микроскопа.

Пространственное распределение числа реакций радиационного захвата нейтронов ^{238}U измерялось с помощью урановых фольг естественного состава. Число реакций радиационного захвата ^{238}U соответствует количеству ^{239}Pu , образующемуся в результате цепочки β -распадов ^{239}U :



Измерение γ -спектров облученных фольг проводили с помощью двух детекторов из особо чистого германия (HPG) – планарного рентгеновского детектора ORTEC (model GLP-36360/13) и детектора CANBERRA (model GR1819-7600SL). Сразу после облучения число реакций радиационного захвата определялось с помощью детектора ORTEC по выходу γ -линии с энергией 74,66 кэВ, сопровождающей распад ^{239}U . А через 4 часа после окончания облучения (более 10 периодов полураспада ^{239}U) с помощью детектора CANBERRA по выходу γ -линии с энергией 277,6 кэВ, сопровождающей распад ^{239}Np . Число реакций радиационного захвата, определенное с помощью двух детекторов, совпало в пределах ошибок.

Кроме этого, в измеренных детектором CANBERRA спектрах было идентифицировано большое количество γ -линий, соответствующих распаду радиоактивных осколков деления в интервале массового числа $A=88...146$ (^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{97}Zr , ^{105}Ru , ^{131}I , ^{132}Te , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{143}Ce , ^{146}Ce и др.). По измеренной интенсивности γ -линий были определены полные количества ядер этих нуклидов, нарабатанных за весь сеанс облучения в различных точках уран-свинцовой сборки. Из количества образовавшихся продуктов деления, у которых выходы на одно деление близки для нейтронов в широком энергетическом диапазоне, можно определить число

реакций деления ^{238}U . Число делений определялось усреднением результатов для следующих осколков: ^{97}Zr (5,7 %), ^{131}I (3,6 %), ^{133}I (6,3 %), ^{143}Ce (4,3 %). В скобках – средний кумулятивный выход для спектра деления и для 14 МэВ нейтронов.

Определение флюенса упавших на свинцовую мишень ускоренных дейтронов проводилось с помощью стандартной методики активации алюминиевой фольги в реакции $^{27}\text{Al}(d,3p2n)^{24}\text{Na}$. Сечение реакции для заданной энергии пучка выбиралось путем аппроксимации известных экспериментальных значений [4,5] (Рис.2).

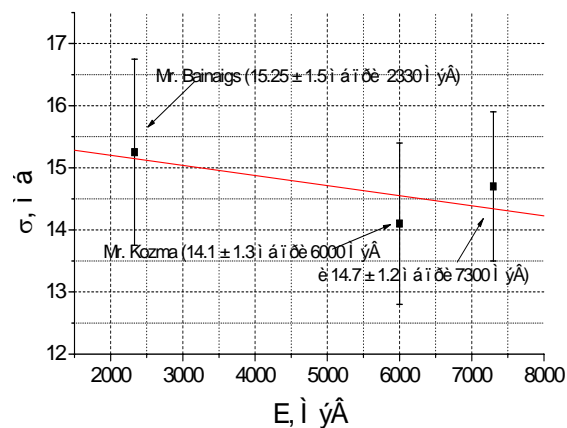


Рис.2. Экспериментальные значения сечения реакции $^{27}\text{Al}(d,3p2n)^{24}\text{Na}$

Для трех энергий пучка флюенс дейтронов составил $2,5 \times 10^{13}$ (1,6 ГэВ), $6,5 \times 10^{12}$ (2,52 ГэВ) и $2,0 \times 10^{13}$ (4 ГэВ). Ввиду малого количества известных экспериментальных данных по сечениям реакций для Al-мониторатора ошибка в определении потока составляет ~10 %.

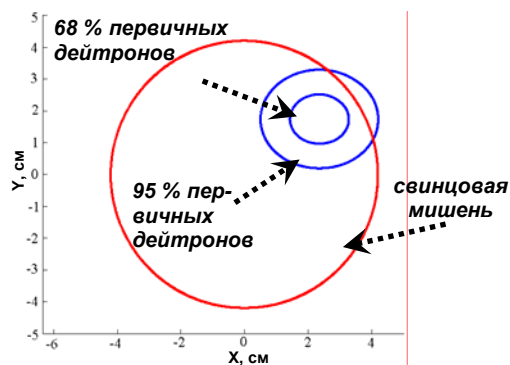


Рис.3. Положение пучка дейтронов на свинцовой мишени ($E_d=4$ ГэВ)

Определение положения пучка на мишени проводилось с помощью набора сенсоров ТТДя со свинцовыми фольгами, которые располагались на переднем торце свинцовой мишени.

Плотность треков, образовавшихся в слюде за счет реакции $^{238}\text{U}(d,f)$, пропорциональна пространственному распределению первичных дейтронов. Результат аппроксимации экспериментальных данных по положению пучка дейтронов с энергией 4 ГэВ на свинцовой мишени показан на Рис.3.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис.4,5 представлены примеры аксиальных ($R=60$ мм) и радиальных ($Z=236$ мм) экспериментальных распределений числа реакций радиационного захвата $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ и числа делений $^{238}\text{U}(n,f)$ по объему U/Pb-сборки для энергий дейтронов 1,6; 2,52 и 4 ГэВ. Показаны также расчетные значения для 4 ГэВ, полученные путем моделирования программой FLUKA2008 [3].

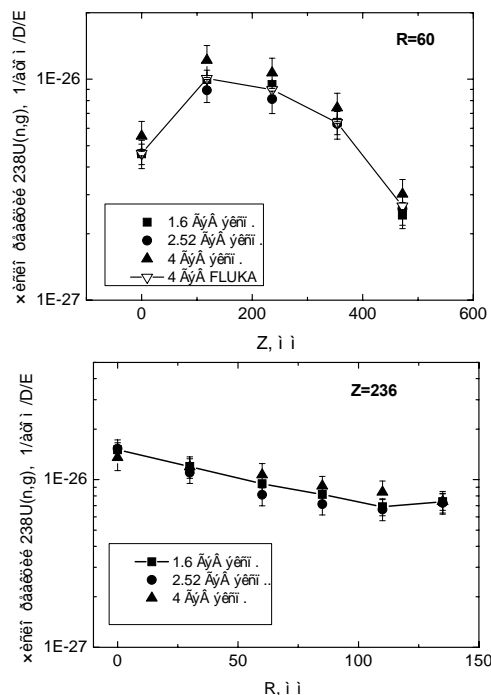


Рис.4. Распределения числа реакций радиационного захвата $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ для U/Pb-сборки при энергии дейтронов 1,6; 2,52; 4 ГэВ. Данные приведены на одно ядро ^{238}U , на один дейтрон и на 1 ГэВ: вверху – аксиальные распределения ($R=60$ мм); внизу – радиальные ($Z=236$ мм)

Поскольку деление ^{238}U – пороговый процесс, то распределения числа делений отражают распределения в сборке нейтронов с энергией $E > 1$ МэВ. В то же время, распределения числа реакций радиационного захвата характеризуют распределение по сборке мягкой части нейтронного спектра и, соответственно, наработку ^{239}Pu в урановом бланкете. Из представленных на графиках данных видно, что наработка ^{239}Pu по урановому бланкету происходит достаточно равномерно (за исключением точек, лежащих вне бланкета на торцах сборки – аксиальные распределения на Рис.4): от центра сборки к периферии уменьшение наработки плутония не более чем в 2 раза. Небольшой рост числа реакций $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ на границе уранового бланкета и радиационной защиты связан с замедлением и рассеянием нейтронов непосредственно в материалах защиты. В отличие от реакций радиационного захвата, число делений ^{238}U резко падает (более чем в 10 раз) от центральной оси сборки к периферии (радиальные распределения, Рис.6).

Из результатов эксперимента следует, что вид пространственных распределений реакций $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ и делений $^{238}\text{U}(n,f)$ не зависит от энергии первично-

го пучка дейтронов в пределах экспериментальных ошибок. Количество этих реакций примерно пропорционально мощности пучка дейтронов и не зависит (или слабо зависит – в пределах 10...15 % экспериментальных ошибок) от энергии дейтронов.

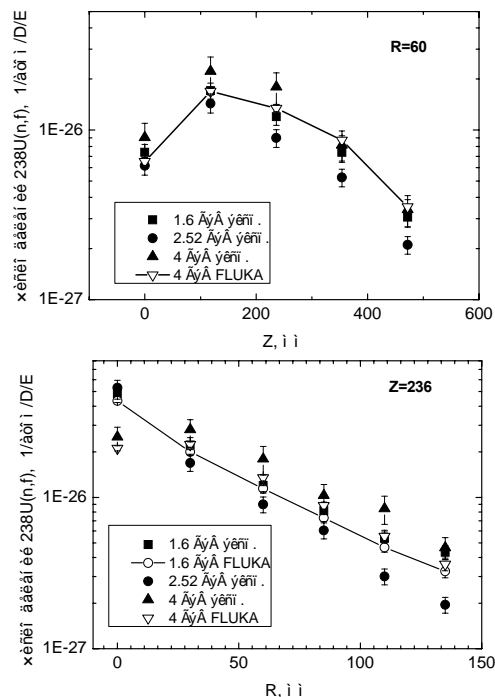


Рис.5. Распределения числа делений $^{238}\text{U}(n,f)$ для U/Pb сборки при энергии дейтронов 1,6; 2,52; 4 ГэВ. Вверху – аксиальные распределения ($R=60$ мм); внизу – радиальные ($Z=236$ мм)

Сравнение экспериментальных результатов с расчетными результатами, полученными моделированием по программе FLUKA2008, показывает хорошее согласие для большей части U/Pb-сборки. К сожалению, на данном этапе не удалось корректно описать при моделировании (FLUKA2008) замедление и рассеяние нейтронов в радиационной защите сборки. Ранее, в работе [1], было проведено моделирование по программе MCNPx 2,5e для энергии дейтронов 2,52 ГэВ и также было получено хорошее согласие с экспериментальными данными. Расхождение (1,5 раза) наблюдалось только на границе уранового бланкета и биологической защиты сборки.

Полученные распределения реакций захвата и деления позволяют построить распределения спектральных индексов $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$. Спектральные индексы – это отношение средних (эффективных) сечений различных реакций в данном спектре нейтронов. Спектральный индекс $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$ характеризует соотношение между скоростями захвата и деления нейтронов в материале уранового бланкета, а также несет информацию о спектральном составе потока нейтронов в ядерно-физической установке. Знание спектральных индексов и наличие компьютерного кода, позволяющего достаточно точно их рассчитывать, является весьма важным для проектирования энергетических ADS-систем. Экспериментальные значения спектральных индексов являются наиболее точными и удобными величинами

для сравнения с результатами моделирования по программам типа FLUKA, MCPNX, так как они не содержат в себе погрешность, связанную с неопределенностью флюенса первичных частиц, бомбардирующих мишень в ADS-устройствах.

На Рис.6 приведен пример экспериментальных и расчетных значений спектрального индекса $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$ (аксиальное распределение для R=60 мм).

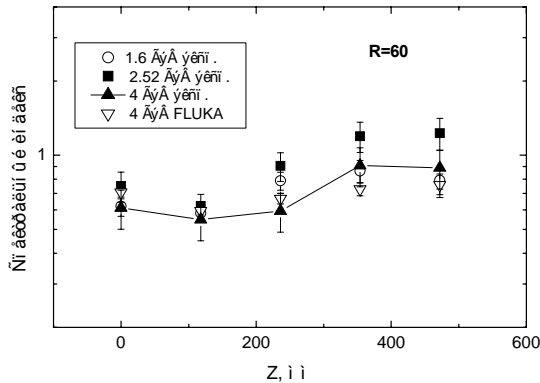


Рис.6. Аксиальное распределение (R=60 мм) спектрального индекса $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$ для U/Pb-сборки при энергии дейтронов 1,6; 2,52; 4 ГэВ

Результаты нашего эксперимента и проведенного расчета (код FLUKA) значений спектрального индекса $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$ в бланкете U/Pb-сборки совпадают в пределах погрешности измерений и не зависят от энергии дейтронов в пределах экспериментальных ошибок.

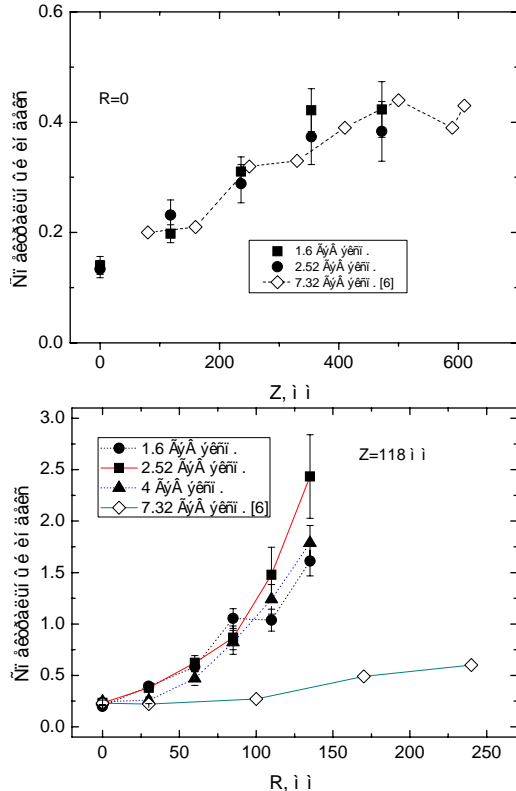


Рис.7. Пространственные распределения спектральных индексов для U/Pb-сборки (1,6; 2,52; 4 ГэВ) и для свинцового блока размерами 50×50×80 см ($E_d=7,3$ ГэВ). Вверху – аксиальные распределения (R=0, вдоль оси мишени); внизу – радиальные (Z=118 мм)

На Рис.7 для сравнения представлены экспериментальные распределения спектральных индексов $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$ для U/Pb сборки и для полностью свинцовой мишени размерами 50×50×80 см, облучаемой дейтронами с энергией 7,3 ГэВ (результаты работы [6]). Видно, что аксиальные распределения спектральных индексов (вдоль оси свинцовой мишени) практически идентичны для всех четырех пучков. В то время, как для радиальных распределений виден значительный вклад нейтронов, образующихся при делении урана бланкета в случае U/Pb-сборки.

На основе полученных пространственных распределений реакций радиационного захвата нейтронов и делений ^{238}U в бланкете уран-свинцовой сборки (всего 15 точек) можно определить полное количество ^{239}Pu и полное число делений ^{238}U в целом по всему объему урана.

Полное число ядер ^{239}Pu и полное число делений в урановом бланкете (на 1 дейтрон и на 1 ГэВ энергии пучка)

E _d , ГэВ	^{239}Pu		$^{238}\text{U}(n,f)$	
	Эксперимент	MCNPx [1]	Эксперимент	FLUKA
1,60	3,3(4)		3,1(3)	3,1
2,52	3,1(3)	2,7	2,8(3)	3,0
4,00	3,9(4)		4,3(4)	3,6

В таблице приведены интегральные экспериментальные (интерполяция экспериментальных точек по объему урана) и расчетные (интерполяция расчетных точек) значения нарабатываемого количества ^{239}Pu и числа делений ^{238}U для энергий дейтронов 1,6; 2,52 и 4 ГэВ. Результаты приведены на 1 дейтрон и на 1 ГэВ. Имеется хорошее согласие между экспериментальными и расчетными результатами. Экспериментальные значения для 4 ГэВ несколько превышают значения для энергий дейтронов 1,6 и 2,52 ГэВ. Частично это связано с разным положением пучка на мишени (см. Рис.3). При моделировании программой FLUKA положение пучка на мишени также учитывалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования при использовании компьютерного кода FLUKA2008, а также кода MCNPx 2,5e (для энергии дейтронов 2,52 ГэВ в работе [1]) показало хорошее согласие результатов эксперимента с расчетами, т.е. расчетные модели, в основном, корректно описывают перенос частиц внутри бланкета. Имеются различия между экспериментом и расчетами для периферии бланкета вблизи биологической защиты.

Экспериментально показано, что в пределах ошибок (~10...15%) наработка ^{239}Pu и число делений ^{238}U в урановом бланкете прямо пропорциональны интенсивности пучка дейтронов и энергии дейтронов (в диапазоне 1,6...4 ГэВ). Для данного диапазона энергий дейтронов подобные эксперименты проведены впервые.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Воронко, В.В. Сотников, В.В. Сидоренко, И.В. Жук, А.С. Потапенко, М.И. Кривоустов, С.Р. Хашеми-Несхад, П.С. Кизим. Нейтронно-физические характеристики уран-свинцовой сборки, бомбардируемой релятивистскими дейтронами // *Вісник ХНУ ім. Каразіна*. 2006, № 746, с.75-81.
2. В.А. Воронко, В.В. Сотников, В.В. Сидоренко, В.В. Жук, И.В. Жук, А.С. Потапенко, М.И. Кривоустов, П.С. Кизим. Генерация нейтронов в уран-свинцовой сборке при облучении дейтронами с энергией 1,6 ГэВ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. (47). 2008, № 1, p.174-178.
3. A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso', and J. Ranft. FLUKA: a multi-particle transport code // *CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773*.
4. J. Banaigs, et al. Determination De L'Intensite D'Un Faisceau De Deutons Extrait D'Un Synchrotron Et Mesure Des Sections Efficaces Des Reactions C-12(D,P2N)C-11 et Al-27(D,3P2N)Na-24 a 2.33 GeV // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1971, v.96, p.307-311.
5. P. Kozma and V.V. Yanovski. Application of BaF₂ scintillator to off-line gamma ray spectroscopy // *Czech Journal of Physics*. 1990, v.40, p.393-397.
6. V.M. D'yachenko, V.A. Voronko, V.Ya. Kostin, K.D. Tolstov, et al. Neutron generation in a lead target by protons, deuterons, and α -particles with momentum of 4.5 GeV/c per nucleon // *Atomic Energy, Springer New York*. 1989, v.67, p.783-785.

Статья поступила в редакцию 25.05.2012 г.

COMPARISON OF NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF U/Pb SUBCRITICAL ASSEMBLY IRRADIATED BY 1.6, 2.52 AND 4 GeV DEUTERONS

V.A. Voronko, V.V. Sotnikov, M.Yu. Artiushenko, Y.T. Petrusenko, I.V. Zhuk, A.S. Potapenko, A.A. Safronova, M.G. Kadykov, S.I. Tyutyunnikov, V.V. Chilap, A.V. Chinenov

The first results of the study processes of neutrons generation in the uranium-lead subcritical assembly irradiated by 4 GeV deuterons are presented. The radial and axial distributions of radioactive capture reactions and the number of ²³⁸U fissions were obtained, as well as the spectral index $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$, in volume of lead target and uranium blanket. The total amount of ²³⁹Pu accumulated in the uranium blanket and total number of ²³⁸U fissions were determined. A comparison of neutron-physical characteristics of the U/Pb subcritical assembly relative to the energy of the primary deuteron beam (1.6, 2.52 and 4 GeV) was performed. A comparison between experimental data and calculations performed using the program FLUKA2008.

ПОРІВНЯННЯ НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК U/Pb ПІДКРИТИЧНОЇ ЗБІРКИ, ОПРОМІНЕНОЇ ДЕЙТРОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ 1,6; 2,52 і 4 ГеВ

В.А. Воронко, В.В. Сотніков, М.Ю. Артюшенко, Ю.Т. Петрусенко, І.В. Жук, А.С. Потапенко, А.А. Сафронова, М.Г. Кадиков, С.І. Тютюнников, В.В. Чілап, А.В. Чіменов

Представлені перші результати дослідження процесів генерації нейтронів в уран-свинцевій підкритичній збірці, опроміненої релятивістськими дейтронами з енергією 4 ГеВ. Отримані радіальні та аксіальні розподіли числа реакцій радіаційного захоплення і числа ділень ²³⁸U, а також спектрального індексу $\bar{\sigma}_{capt}^{238U} / \bar{\sigma}_f^{238U}$ в об'ємі свинцевої мішені та уранового бланкету. Визначено повну кількість напрацьованого в урановому бланкеті ²³⁹Pu і числа ділень ²³⁸U. Виконано порівняння нейтронно-фізичних характеристик U/Pb підкритичної збірки відносно енергії первинного пучка дейтронів (1,6; 2,52 і 4 ГеВ). Проведено порівняння між експериментальними даними та розрахунками, виконаними з використанням програми FLUKA2008.