

Национальная академия наук Беларуси
Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –
Сосны

УДК 539.172.4:125.52

ПОТАПЕНКО
Андрей Сергеевич

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ С БЛАНКЕТОМ ИЗ
ЕСТЕСТВЕННОГО УРАНА, УПРАВЛЯЕМОЙ УСКОРИТЕЛЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Минск 2011

Работа выполнена в Государственном научном учреждении
«Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
НАН Беларуси

Научный
руководитель: Жук Игорь Владимирович, кандидат технических наук,
заведующий лабораторией «Экспериментальных ядерно-
физических исследований и экспертных анализов
радиоактивных материалов» ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны»
НАН Беларуси

Официальные
оппоненты: Тверковкин Борис Евгеньевич, доктор технических наук,
профессор, главный научный сотрудник лаборатории
«Стратегические исследования топливно-энергетического
комплекса» ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси

Зязюля Федор Емельянович, кандидат технических наук,
заведующий лабораторией «Электронных методов и
средств эксперимента» «Национальный научно-учебный
центр физики частиц и высоких энергий БГУ»

Оппонирующая
организация: «Институт физики им. Б.И. Степанова» НАН Беларуси


Защита диссертации состоится «16» марта 2011 г. в 10⁰⁰ часов на
заседании совета по защите диссертаций Д 01.10.01 в Государственном
научном учреждении «Объединенный институт энергетических и ядерных
исследований – Сосны» НАН Беларуси по адресу: 220109, г. Минск, ул.
Акад. А.К. Красина, 99, зал заседания ученого совета, телефон ученого
секретаря (017) 299-45-16.

Отзывы на автореферат диссертации в 2-х экземплярах просим
высылать по адресу: 220109, г. Минск, ул. Акад. А.К. Красина, 99,
ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного
научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных
исследований – Сосны» НАН Беларуси.

Автореферат разослан « » февраля 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук



Лукашевич А.Г.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Идеи по созданию подкритических электроядерных систем, управляемых внешним источником, появились в середине XX века. Ни одна подобная концепция не была реализована по причине серьезных научных и технических трудностей создания мишенных комплексов и ускорителей с высоким током (до 300 мА). Однако, развитие науки и техники, прогресс ускорительной техники, обострение проблем, связанных с функционированием обычной ядерной энергетики, накоплением ОЯТ и процессом разоружения, привели в конце 1980-х годов к переосмыслению и возрождению этих идей в США, ЕС, Японии и России. Во многих странах, в том числе и Беларуси, появились национальные программы по изучению систем, управляемых ускорителем (*ADS – Accelerator Driven System*).

Электроядерные установки являются уникальными с точки зрения ядерной безопасности. *ADS* являются перспективными реакторными системами с возможностями реализации трансмутации радиоактивных отходов, в первую очередь, младших актинидов и по сравнению с ядерными реакторами, работающими в критическом режиме, они на кардинально ином уровне удовлетворяют фундаментальным требованиям обеспечения безопасности. Таким образом, изучение подкритических систем, управляемых ускорителями, приобретает особую актуальность в аспекте трансмутации отходов ядерной энергетики и создания реакторных систем пятого поколения с повышенной ядерной безопасностью.

Для создания полномасштабной реакторной установки, управляемой ускорителем, необходимы экспериментальные данные по сечениям нейтронных реакций, множественности нейтронов и гамма-квантов для различных изотопов в области энергий нейтронов от 20 МэВ до нескольких ГэВ. В этом интервале зачастую отсутствуют экспериментальные данные, а теоретические модели не дают корректного описания. Необходимы эксперименты по изучению нейтронно-физических характеристик *ADS*: пространственных распределений скоростей образования и выгорания радионуклидов, пространственно-энергетических распределений нейтронов в подкритической системе и мишени и т.д. Верификация на основе экспериментальных данных различных компьютерных кодов для расчета нуклон-нуклонных взаимодействий и транспорта частиц еще одна важная фундаментальная задача, без решения которой невозможно проектирование полномасштабного реактора систем пятого поколения для трансмутации РАО и получения энергии.

Настоящая работа посвящена изучению пространственных распределений скоростей реакций по объему подкритической сборки, управляемой

ускорителем и моделирующей материальный состав и спектр нейтронов реактора 5-го поколения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационного исследования утверждена решением Ученого Совета ОИЭЯИ-Сосны НАН Беларуси (приказ №293 от 26.12.2006).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006-2010 годы: п.п.: 6.2. физика фундаментальных взаимодействий, ядерных реакций, квантовых систем и топологически нетривиальных объектов; 6.4. радиационные и ядерно-физические технологии с использованием релятивистских пучков электронов, гамма-квантов и нейтронов (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 17 мая 2005 г. № 512 «Об утверждении перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 годы»).

Научно-исследовательские работы выполнялись в соответствии с государственными программами: ГПФИ «Физика взаимодействий» (Задание 28, № г.р. 20021057 в ГУ «БелИСА»), ГПФИ «Поля и частицы» (Задание 35, № г.р. 20063643 в ГУ «БелИСА»).

Экспериментальная часть выполнена в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, РФ) в рамках Координационного плана НИР (утвержден Полномочным представителем Республики Беларусь в Объединенном институте ядерных исследований), выполняемых в ОИЯИ с участием учреждений и организаций Республики Беларусь в 2006-2010 гг. и в соответствии с Проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ и международного сотрудничества ОИЯИ на 2005-2009 гг. (темы 03-1-0940-91/2005-2007 и 03-1-0983-92/2007-2009).

Цель и задачи исследования

Цель работы: Определить экспериментально и рассчитать методом Монте-Карло пространственные распределения скоростей реакции деления тяжелых металлов и скорости реакции радиационного захвата нейтронов на ядрах ^{238}U по объему подкритической сборки, управляемой ускорителем и моделирующей материальный состав и спектр нейтронов ядерно-энергетического реактора 5-го поколения.

Достижение данной цели предполагает решение следующих задач:

- адаптировать трековую методику измерения скоростей реакций деления к условиям ADS (анизотропные нейтронные поля, с максимальной энергией

- нейтронов – несколько ГэВ);
- разработать методику определения параметров пучка первичных частиц на мишени подкритической установки;
 - разработать методику измерений спектрального индекса $\frac{\sigma_c^{238U}}{\sigma_f^{238U}}$ в бланкете установки, обеспечивающую получение информации о скоростях деления и радиационного захвата двумя независимыми методами с одного экспериментального образца;
 - провести экспериментальные исследования по определению пространственных распределений скоростей реакций в подкритической установке, облучаемой пучками релятивистских протонов и дейтронов;
 - провести моделирование пространственно-энергетических распределений адронов и гамма-квантов в подкритической сборке, управляемой ускорителем.

Объект исследования – подкритическая сборка, управляемая ускорителем.

Предмет исследования – пространственное распределение скоростей реакций деления тяжелых металлов и скорости реакции радиационного захвата нейтронов на ядрах ^{238}U в подкритической сборке.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований пространственных распределений скоростей реакции деления ядер ^{238}U , ^{235}U , ^{239}Pu и скорости реакции радиационного захвата нейтронов на ядрах ^{238}U , впервые полученные для подкритической уран-свинцовой сборки на основе толстой свинцовой цилиндрической мишени и бланкета из естественного урана, облучаемой пучками протонов с энергией 1,5 ГэВ и дейтронов с энергиями 1,6 и 2,5 ГэВ, моделирующей материальный состав и спектр нейтронов ядерно-энергетического реактора 5-го поколения для производства энергии и трансмутации РАО.
2. Результаты расчетов методом Монте-Карло пространственно-энергетических распределений нейтронов, гамма-квантов и заряженных адронов в указанной сборке, облучаемой пучками протонов с энергией 1,5 ГэВ и дейтронов с энергиями 1,6 и 2,5 ГэВ.
3. Комбинированная треково- γ -спектрометрическая методика измерений спектрального индекса $\frac{\sigma_c^{238U}}{\sigma_f^{238U}}$ в подкритической сборке, обеспечивающая получение информации о скоростях деления и радиационного захвата двумя независимыми методами с одного экспериментального образца.
4. Трековая методика определения параметров пучка первичных частиц по реакции деления ^{239}Pu , отличающаяся тем, что позволяет измерять

параметры пучка первичных частиц непосредственно на мишени ядерно-энергетической установки, управляемой внешним источником, и не чувствительна к фону обратно рассеянных вторичных частиц.

Личный вклад соискателя

Вклад автора в совместных работах состоял в адаптации применительно к условиям *ADS* трековых методик измерения абсолютных скоростей деления нуклидов ^{235}U , ^{238}U и ^{238}Pu ; проведении подготовки к экспонированию сенсоров в экспериментальной установке, обработке и анализе результатов измерений; моделировании экспериментов на *ADS*; интерпретации полученных результатов. Лично автором разработаны: трековая методика определения параметров пучка первичных частиц и комбинированная треково- γ -спектрометрическая методика измерений спектрального индекса $\frac{\sigma_c^{238\text{U}}}{\sigma_f^{238\text{U}}}$ в подкритической сборке.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях:

- 23-я международная конференция «Nuclear Track Detectors», 11-15 сентября 2006 г., Пекин, КНР;
- XVIII Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика», 25-30 сентября 2006 г., Дубна, РФ;
- Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке – 2006», 18-22 октября 2006 г., Минск, РБ;
- Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке – 2007», 23-26 октября 2007 г., Минск, РБ;
- VI Международная конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 25-29 февраля 2008 г., Харьков, Украина;
- XXI Международный семинар «Charged Particle Accelerators», 6-12 сентября 2008 г., Алушта, Украина;
- Международное совещание МАГАТЭ «IAEA Technical Meeting on Applications of accelerators in real-time studies of materials» 15 - 19 сентября 2008 г., Вена, Австрия;
- XIX Международный Балдинский семинар по проблемам физики высоких энергий, 29 сентября – 4 октября 2008 г., Дубна, РФ;
- VII Международная конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 25-29 февраля 2009 г., Харьков, Украина;
- Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке – 2009», 21-24 апреля 2009 г., Минск, РБ;

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 13 печатных работ, из них 9 статей в научных журналах, 2 статьи в сборниках конференций, 2 препринта. Объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,03 авторских листа, прочих – 2,77 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 146 страниц, 19 таблиц и 39 рисунков. Приложения и список использованных источников из 261 наименования, включая собственные публикации, занимают 29 страниц, текст диссертации занимает 116 страниц (без учета рисунков и таблиц – 87 страниц).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность и определена цель исследований.

В первой главе представлен обзор литературы по теме экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик (НФХ) подкритических систем, управляемых ускорителями, и обоснован выбор направления исследований подобных систем. Анализ литературных источников показал, что практически полностью отсутствуют результаты исследования НФХ, а также интегральные ядерные данные (по скоростям деления нуклидов и спектральным индексам (SI)) гибридных ADS , состоящих из тяжело-металлической мишени и blankets из делящегося вещества, при бомбардировке протонами и дейтронами с кинетическими энергиями больше 1 ГэВ.

Во второй главе изложены теоретические основы методики, базирующейся на методе твердотельных трековых детекторов (ТТДя) и позволяющей проводить измерения в ADS абсолютных скоростей деления нуклидов и SI с использованием экспериментальных сенсоров, состоящих из радиаторов (источников осколков деления) и трековых детекторов, и предварительно откалиброванных в стандартных полях нейтронов. В этой главе также обоснован выбор нуклидов для исследования НФХ ADS , дано описание применяемых радиаторов и трековых детекторов. Описана методика и приведены результаты калибровки сенсоров в стандартных полях нейтронов (быстром с $E_n=14,7$ МэВ и тепловом). Приведены результаты экспериментальной калибровки сенсоров на основе ТТДя с радиаторами из естественного свинца на протонных и дейтронных пучках ускорителя «Нуклотрон» (энергия протонов 0,7; 1,0; 1,5 и 2,0 ГэВ, энергия дейтронов 1,0 и 4,0 ГэВ).

ТТДя методика измерения абсолютных скоростей реакций деления в реакторных системах адаптирована для применения к условиям *ADS* – рассмотрено влияние кинематических эффектов и эффектов, возникающих при процессе высокоэнергетического деления ядер, на показания сенсоров ТТДя, вычислены соответствующие поправки:

1. Рассчитано влияние кинематики процесса деления на коэффициент чувствительности сенсоров:
 - Рассмотрен эффект передачи импульса осколкам деления, показано, что для корректного расчета скорости реакции необходимо регистрировать осколки в 4 π -геометрии (в передней и задней полусферах);
 - Рассмотрен эффект асимметрии деления, показано, что влияние этого эффекта на счетность треков минимально.
2. С помощью расчета методом Монте–Карло показано, что эффект переноса импульса делящемуся ядру полностью компенсируется, если треки осколков деления регистрируются в обеих полусферах. Эффект анизотропии вылета осколков деления мал. В спектре нейтронов, генерируемых в толстых мишенях, основную часть (~80%) составляют нейтроны с энергией до 20 МэВ, которые вносят основной вклад в деление ядер урана. С учетом этого и того, что поле нейтронов с энергией <20 МэВ практически изотропно, данный эффект можно не учитывать при определении скоростей реакции деления ядер ^{235}U и ^{238}U . В силу неизотропности нейтронных полей с энергией более 50 МэВ эффект анизотропии вылета осколков деления должен быть учтен только для высокопорогового деления ядер свинца. При расчете скоростей деления ядер свинца была введена поправка 2% для учета указанного эффекта.
3. Исследована зависимость коэффициента чувствительности от массового распределения и кинетической энергии осколков деления и фрагментации ядер при энергиях налетающих частиц 0,1-10 ГэВ с помощью программных кодов *FLUKA* и *SRIM*. Показано что:
 - Коэффициент чувствительности для осколков деления не зависит от энергии и типа частиц, вызывающих реакцию деления;
 - Количество фоновых треков от фрагментов промежуточной массы (процессы фрагментации ядра и сильно асимметричного деления ядер) начинает возрастать при энергии бомбардирующих частиц > 500 МэВ. При энергиях выше указанного порога для расчета скорости реакции деления необходимо использовать вместо сечения деления – феноменологическое сечение образования трека или использовать поправочный коэффициент, зависящий от энергии налетающей частицы.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчетов коэффициентов чувствительности сенсоров из ТТДя, выполненных для ядер-осколков деления.

Экспериментальные значения для свинцовых радиаторов получены с учетом вклада в счетность треков процессов мультифрагментации. Данные приведены для геометрии измерений 4л – трековые детекторы находятся с двух сторон от радиатора – источника осколков деления. Коэффициент чувствительности представляет собой среднее арифметическое значение $k=(k_b+k_f)/2$, где k_b и k_f – соответственно коэффициенты чувствительности ТТДя, находящегося в передней («face») и задней полусферах («back»).

Таблица 1 – Коэффициенты чувствительности сенсора (искусственная слюда+свинец)

Частица/энергия, МэВ	Коэффициент чувствительности, 10^{19} трек·см ⁻² ·протон ⁻¹	
	Эксперимент	Расчет
P / 700	0,9±0,10	1,08±0,05
P / 1000	0,9±0,10	1,07±0,07
P / 1500	1,05±0,05	1,04±0,07
P / 2000	1,1±0,10	1,01±0,07
D / 1000	1,0±0,15	1,05±0,07
D / 4000	1,12±0,15	1,1±0,07
N / 600	-	1,02 ±0,07
N / 60	-	0,99 ±0,10

Таблица 2 – Коэффициенты чувствительности сенсора (ТТДя+уран)

Частица/энергия, МэВ	Коэффициент чувствительности, 10^{19} трек·см ⁻² ·протон ⁻¹			
	ТТДя искусственная слюда		ТТДя лавсан	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
N / тепловое	0,95±0,03	0,97±0,03	1,21±0,04	1,23±0,03
N / 14,7	0,96±0,03	0,97±0,03	1,20±0,04	1,23±0,03
N / 20	-	0,95±0,03	-	1,21±0,03
N / 150	-	0,99±0,03	-	1,26±0,03
P / 1000	-	0,95±0,03	-	1,21±0,03

В таблицах литеры *N*, *P*, и *D* обозначают тип налетающей частицы: нейтрон, протон и дейтрон соответственно.

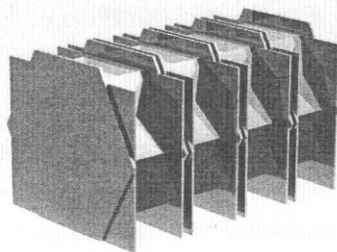
В **третьей главе** представлены результаты исследований пространственно-энергетического распределения нейтронов в подкритической сборке установки «Энергия плюс трансмутация». Экспериментальные исследования базировались на измерениях скоростей деления изотопов урана и природного свинца и соответствующих пороговых спектральных индексов s

использованием метода ТТДя. Описаны разработанные методики измерений спектрального индекса $\frac{\overline{\sigma_c^{238U}}}{\overline{\sigma_f^{238U}}} / \frac{\overline{\sigma_c^{235U}}}{\overline{\sigma_f^{235U}}}$ в подкритической сборке и трековая методика определения параметров пучка первичных частиц.

В главе отражены результаты экспериментального изучения и теоретического расчета пространственно-энергетических характеристик нейтронных полей, формируемых в объеме подкритической сборки установки «Энергия плюс трансмутация» (рисунок 1), бомбардируемой протонами кинетической энергией 1,50 ГэВ и дейтронами с энергиями 1,60 и 2,52 ГэВ, а именно:

- измерение аксиальных и радиальных распределений скоростей деления ^{238}U и ^{235}U и $SI \frac{\overline{\sigma_c^{238U}}}{\overline{\sigma_f^{238U}}} / \frac{\overline{\sigma_c^{235U}}}{\overline{\sigma_f^{235U}}}$ по объему сборки;
- измерение скоростей деления ^{208}Pb по объему сборки;
- определение параметров первичных пучков;
- измерение аксиальных и радиальных распределений скоростей радиационного захвата $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ и $SI \frac{\overline{\sigma_c^{238U}}}{\overline{\sigma_f^{238U}}} / \frac{\overline{\sigma_c^{238U}}}{\overline{\sigma_f^{238U}}}$ по объему сборки;
- экспериментальное определение накопления ^{239}Pu в бланкете установки;
- определение параметров первичных пучков с использованием ТТДя методики (по скорости реакции $^{208}\text{Pb}(p,f)$ и $^{208}\text{Pb}(d,f)$);
- расчеты методом Монте-Карло пространственно-энергетических распределений нейтронов, гамма-квантов и заряженных адронов в U/Pb сборке.

а)



б)

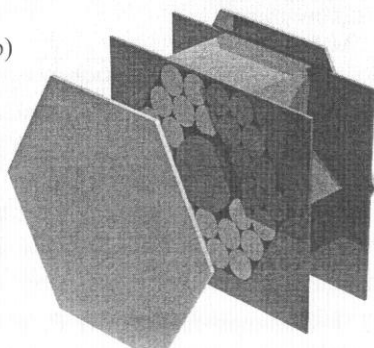


Рисунок 1 – Изображение подкритической сборки установки «Энергия плюс трансмутация»:

- а) Четырехсекционная сборка – схематический вид;
 б) мишень и секция бланкета, помещенных в стальной контейнер

Для определения параметров первичных пучков использовались трековые детекторы с радиаторами из естественного свинца. Ниже приведено описание данной методики:

1. Сенсоры размещались на первой пластине перед свинцовой мишенью. Измерительные точки располагались в двух направлениях по азимутам $0 - 180^\circ$ (горизонтально) и $90^\circ - 270^\circ$ (вертикально).
2. Плотность треков осколков деления свинца, характеризующая пространственное распределение первичного пучка, хорошо аппроксимируется трехмерным распределением Гаусса. Исходя из этого предположения, были получены следующие данные о пространственном расположении первичных пучков (таблица 3).
3. Вторичные частицы, образовавшиеся в мишени и рассеянные в обратном направлении, также вызывают деления свинца. С помощью расчетов, сделанных в программе *FLUKA*, показано, что форма первичного пучка полностью определяется реакцией $^{208}\text{Pb}(p,f)$ для протонных пучков и реакцией $^{208}\text{Pb}(d,f)$ – для дейтронных пучков.
4. Учет влияния процессов мультифрагментации ядер на счетность треков на трековых детекторах сделан согласно поправкам, рассчитанным в главе 2.
5. Эффект передачи импульса делящимся ядрам свинца компенсируется геометрией сенсора – когда фрагменты фиксируются в геометрии 4л.

Таблица 3 – параметры первичных пучков

Тип частиц	Энергия, ГэВ/ нуклон	FWHM гауссова распределения (см)		Положение центра (см)		Интеграл пучка (данные ТТДя)
		Ось X	Ось Y	Xc	Yc	
дейтроны	1,26	1,5	1,6	1,5	-0,3	$(6,1 \pm 0,04) \times 10^{12}$
дейтроны	0,80	2,8	1,9	-0,6	-0,4	$(1,9 \pm 0,04) \times 10^{13}$
протоны	1,50	2,3	3,6	-1,2	-0,3	$(1,1 \pm 0,04) \times 10^{13}$

Среди достоинств ТТДя методики определения профиля первичного пучка, можно отметить следующие: возможность обработки данных off-line (что позволяет использовать большое количество сенсоров для точного определения параметров аппроксимирующей функции); низкий фон вторичных частиц; возможность размещать сенсоры непосредственно на мишени (что позволяет находить реальное положение центра пучка относительно центра мишени); параметры пучка, определенные при помощи ТТДя, представляют собой интегральные данные, что позволяет использовать их в программных кодах без предварительной математической обработки.

Для экспериментальных измерений пространственных распределений скоростей реакции деления ^{238}U , ^{235}U и $^{\text{ест}}\text{Pb}$ использовались сенсоры с радиаторами из $^{\text{ест}}\text{U}$ и $^{\text{ест}}\text{Pb}$, в качестве ТТДя использовалась искусственная слюда и лавсан.

Позиции для размещения сенсоров на детекторных пластинах показаны на рисунке 2. На каждой пластине имелось по 6 позиций, расположенных на разных расстояниях от продольной оси симметрии мишени. Позиция 1 располагалась на оси свинцовой мишени. Позиция 2 располагалась на расстоянии 30 мм от оси мишени, позиция 3 – на расстоянии 60 мм, позиция 4 – на расстоянии 85 мм, позиция 5 – на расстоянии 110 мм, позиция 6 – на расстоянии 135 мм. Необходимо отметить, что позиции 1 и 2 находились внутри свинцовой мишени, позиции 3, 4 и 5 – внутри уранового blankets, а позиция 6 – вне blankets.

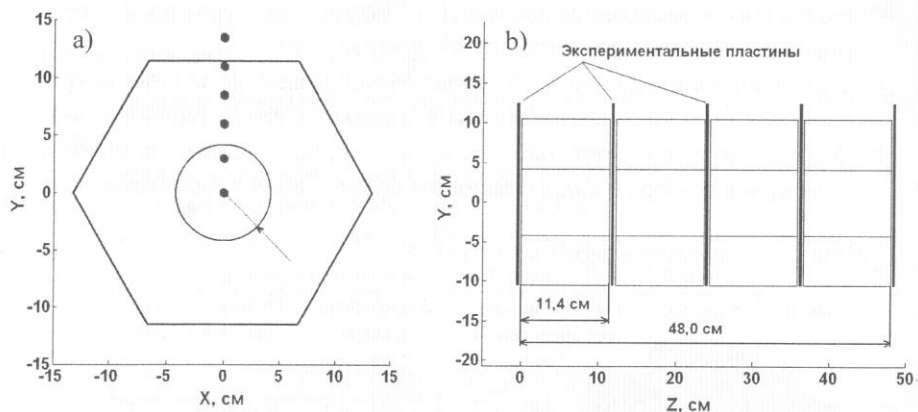


Рисунок 2– Схематическое изображение позиций сенсоров:
а) Размещение сенсоров на детекторной пластине;
б) Размещение детекторных пластин между секциями blankets

Распределение скоростей деления нуклидов характеризует пространственное распределение нейтронов в рассматриваемой системе. В частности, распределение скорости деления ^{238}U характеризует пространственное распределение быстрых нейтронов с энергией большей или равной энергии его порога деления ($\sim 1,0$ МэВ).

Анализ экспериментальных данных указывает на две особенности распределения скорости деления $^{\text{ест}}\text{U}$ по объему сборки. Скорость реакции быстро падает в радиальном направлении от оси сборки – значения экспериментальных величин с хорошей точностью аппроксимируются

экспоненциальной зависимостью вида: $a \cdot \exp(-b \cdot R)$, где R – расстояние от оси сборки см; параметр b изменяется от 0,27 для распределения на второй экспериментальной пластине до 0,19 – для пятой. Аксиальное же распределение скорости деления ^{235}U существенно различается для мишени и непосредственно для бланкета.

Как видно из рисунка 3, результаты измерения радиального распределения в эксперименте с дейтронным пучком энергией 2,52 ГэВ числа реакций деления урана, полученные двумя независимыми экспериментальными методами, совпадают в пределах ошибок измерений начиная с расстояния 30 мм от продольной оси U/Pb сборки. Расчет также хорошо (наблюдается согласие эксперимента и расчета в области бланкета - за исключением первой пластины – в пределах экспериментальной погрешности) описывает процесс деления в материале бланкета (естественном уране) и на периферии сборки. Это свидетельствует о том, что расчетная модель в основном правильно описывает перенос частиц в веществе бланкета. Необходимо отметить, что в области мишени эксперимент превышает расчет, так как при расчете учитывались только реакции, вызванные вторичными нейтронами $^{235}\text{U}(n,f)$.

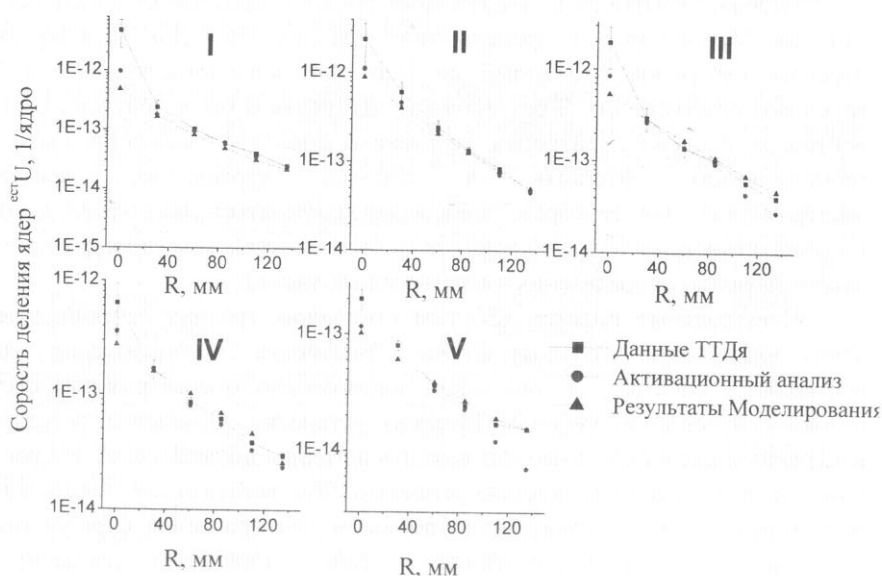


Рисунок 3 – Радиальные распределения скоростей реакции деления ^{235}U в установке «Энергия плюс трансмутация» при облучении дейтронами с энергией 2,52 ГэВ, для первой, второй, третьей, четвертой и пятой экспериментальной пластины соответственно

Деления в урановых образцах, как в целом и в бланкете, индуцируется не только вторичными нейтронами, но также частицами первичного пучка, вторичными адронами (в основном заряженными пионами и протонами) и гамма-квантами. В таблице 4 приведен процентный вклад различных процессов деления в полную скорость реакции деления ^{238}U в подкритической сборке – данные расчета по программе *FLUKA* для трех экспериментов.

Таблица 4 – Процентный вклад различных процессов деления в общее количество делений ^{238}U в бланкете

Тип деления	Дейтронный пучок, E=1,60 ГэВ	Дейтронный пучок, E=2,52 ГэВ	Протонный пучок, E=1,50 ГэВ
^{238}U (n,f)	96,3%	96,2%	96,76%
^{238}U (p,f)	3,0%	3,1%	1,52%
^{238}U (π ,f)	0,5%	0,6%	0,40%
^{238}U (γ ,f)	0,2%	0,1%	1,32%
^{238}U (*,f)	100,0%	100,0%	100%

Перенос нейтронов в гетерогенных средах моделируется в коде *FLUKA* методом Монте-Карло в транспортном приближении. Для моделирования переноса нейтронов с энергией до 19,6 МэВ использовалось 72- и 200-групповое приближение. В результате моделирования были получены спектры нейтронов, протонов, дейтронов, заряженных пионов и γ -квантов в локальных геометрических позициях, в которых проводилась экспозиция экспериментальных сенсоров, причем моделировалось положение каждого индивидуального сенсора. Кроме того были рассчитаны пространственно-энергетические распределения вышеназванных частиц.

Спектральные индексы (*SI*) или отношения средних сечений деления дают информацию о соотношении различных энергетических групп нейтронного спектра, т.е. они несут информацию о спектральном составе потока нейтронов в ядерно-физической установке. Сравнение результатов измерения и расчета *SI* позволяет выявить источник погрешностей при расчете характеристик ядерно-физических установок. *SI* являются экспериментальными величинами наиболее точными и удобными для сравнения с результатами расчетов, т.к. они не содержат в себе погрешность, связанную с неопределенностью флюенса первичных частиц.

Спектральный индекс $\frac{\sigma_{\text{capt}}^{238\text{U}}}{\sigma_f^{238\text{U}}}$ характеризует соотношение между скоростями захвата и деления нейтронов в материале уранового бланкета. Для измерения скорости реакции радиационного захвата $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ (активационным

методом – по гамма линии 277,6 кэВ изотопа ^{239}Np) использовались те же фольги, которые служили в качестве радиаторов осколков деления ^{238}U при применении трековой методики. Таким образом, с одних и тех же образцов трековым и γ -спектрометрическим методами снималась информация по скоростям реакций двух процессов: соответственно деления и захвата.

Здесь необходимо отметить некоторые преимущества разработанной методики: в отличие от случая, когда скорость реакции деления ядер урана измеряется активационным методом (по γ -излучающим продуктам деления) – метод ТТДя не требует знания кумулятивных выходов осколков, которые зачастую не известны для нейтронных спектров с граничной энергией $E_n > 14$ МэВ; экспериментальный образец может быть достаточно малой толщины, чтобы пренебречь самоэкранированием нейтронного потока образцом; процедура анализа гамма-спектров значительно упрощается, время измерений на гамма-спектрометре сокращается.

Результаты измерения SI в U/Pb -сборке сравнивались (таблица 5) со спектральными индексами для расчетного спектра в U/Pb -сборке и для трех жестких спектров нейтронов: спектр нейтронов деления ^{235}U ; спектр нейтронов ядерно-физической установки $\Sigma\Sigma$; спектр нейтронов в зоне малого обогащения быстрого реактора-размножителя БН-350.

Таблица 5 – Спектральные индексы U/Pb -сборки (экспериментальные и расчетные; 3-я пластина, расстояние от оси симметрии сборки – 8,5 см – центр уранового бланкета), спектра деления, спектра $\Sigma\Sigma$ и спектра реактора БН-350

U/Pb сборка, облучаемая релятивистскими пучками		
Частица / энергия пучка, ГэВ	индекс $\frac{\sigma_f^{238U}}{\sigma_f^{235U}}$	индекс $\frac{\sigma_{сарт}^{238U}}{\sigma_f^{238U}}$
P 1,5 расчет	0,092±0,006	0,98±0,05
P 1,5 эксперимент	0,094±0,014	-
D 1,6 расчет	0,090±0,005	0,960±0,05
D 1,6 эксперимент	-	1,040±0,13
D 2,52 расчет	0,088±0,005	0,930±0,05
D 2,52 эксперимент	-	1,104±0,14
Эталонные спектры		
спектр деления	0,253	2,370
$\Sigma\Sigma$ - спектр	0,057	2,491
спектр БН-350	0,025	-

Спектр нейтронов деления ^{235}U выбран для сравнения, поскольку он является исходным для ядерных реакторов всех типов и именно из него формируется спектр нейтронов конкретной установки в зависимости от ее конструкции и материального состава. Жесткий спектр нейтронов ядерно-

физической установки $\Sigma\Sigma$, близкий к спектру нейтронов быстрого газоохлаждаемого реактора, сформирован в центре сферической вставки $\Sigma\Sigma$. Нейтронный спектр реактора-размножителя на быстрых нейтронах БН-350 в зоне малого обогачения несколько мягче, чем спектр нейтронов ядерно-физической установки $\Sigma\Sigma$ вследствие значительно большего количества урана и наличия натриевого теплоносителя.

Приведенное в таблице 5 сравнение спектральных индексов внутри бланкета U/Pb -сборки с указанными спектрами, показывает, что спектр нейтронов, формирующийся внутри U/Pb -сборки мягче спектра нейтронов деления и жесте спектра нейтронов бенчмарка $\Sigma\Sigma$ и спектра нейтронов реактора БН-350.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

- I. С помощью ТТДя методики получены экспериментально [1–3] нейтронно-физические характеристики подкритической сборки, моделирующей материальный состав и спектр нейтронов ядерно-энергетического реактора 5-го поколения. Установка на основе свинцовой мишени, окруженной бланкетом из естественного урана, облучалась пучками протонов и дейтронов с энергией более 1 ГэВ. Выявлены следующие закономерности пространственного распределения нейтронов:
 - спектр нейтронов смягчается от оси к периферии сборки – на это указывает распределение значения спектрального индекса $\frac{\sigma_{capt}^{238U}}{\sigma_f^{238U}}$;
 - близкие значения спектральных индексов $\frac{\sigma_{capt}^{238U}}{\sigma_f^{238U}}$ и $\frac{\sigma_{capt}^{238U}}{\sigma_f^{235U}}$ свидетельствуют о том, что спектр нейтронов не изменяется (или слабо зависит) от энергии и типа первичных частиц;
 - аксиальное распределение спектрального индекса $\frac{\sigma_f^{natPb}}{\sigma_f^{238U}}$ указывает на то, что значительная доля ультрабыстрых нейтронов покидает мишень без взаимодействий;
 - скорости реакций деления урана спадает в радиальном направлении от оси сборки по экспоненциальному закону.
- II. Сравнение полученных экспериментальных результатов с расчетными (*FLUKA* модели *RQMD*) показало их удовлетворительное согласие (в пределах погрешностей измерений) для скоростей реакции деления естественного урана и скорости захвата ^{238}U во всех измерительных позициях, расположенных внутри бланкета U/Pb -сборки [4–13]. Для

скоростей деления ^{238}Pu экспериментальные результаты систематически превышают расчетные значения (в среднем в 1,8 раза) для дейтронных пучков с энергией 1,60 и 2,52 ГэВ соответственно, данное расхождение может указывать на систематическую ошибку алгоритма *RQMD* при расчете выхода нейтронов с энергией > 30 МэВ в реакциях расщепления. Показано [5], что в процессе деления урана в бланкете установки доминирующую роль играют реакции, индуцированные нейтронами.

III. Разработана трековая методика определения параметров пучка первичных частиц по реакции деления ^{238}Pu [4, 6, 9], отличающаяся нечувствительностью к фону обратно рассеянных вторичных частиц и позволяющая измерять параметры пучка первичных частиц непосредственно на мишени подкритических установок, управляемых внешним источником. ТТДя методика измерения абсолютных скоростей реакций деления в реакторных системах адаптирована для применения к условиям *ADS* – рассмотрено влияние кинематических эффектов и эффектов, возникающих при процессе высокоэнергетического деления, на показания сенсоров ТТДя, вычислены соответствующие поправки.

IV. Разработана комбинированная треково- γ -спектрометрическая методика измерений спектрального индекса $\frac{\sigma_c^{238U}}{\sigma_f^{238U}}$ в подкритической сборке [10, 12], обеспечивающая получение информации о скоростях деления и радиационного захвата с одного экспериментального образца. Методика не требует знания кумулятивных выходов осколков; экспериментальный образец (с составом идентичным составу бланкета) может быть достаточно малой толщины, чтобы пренебречь самоэкранированием нейтронного потока образцом; процедура анализа гамма-спектров значительно упрощается, время измерений на гамма-спектрометре сокращается.

V. С точки зрения проектирования прототипа полномасштабного подкритического реактора, для производства энергии и трансмутации РАО, полученные экспериментальные и расчетные зависимости означают следующее:

- Подобность нейтронных спектров вне зависимости от энергии и типа первичных частиц означает, что тип и энергия первичного пучка ионов при создании полномасштабной реакторной установки пятого поколения могут быть выбраны только исходя из требований к ускорителю.
- Экспоненциальная зависимость радиальных распределений скоростей деления урана при использовании «тонкого» пучка первичных частиц, сфокусированного на мишень, означает, что в полномасштабной подкритической реакторной установке будет иметь место сильно

неравномерное распределение энергонапряженности в мишенном узле и особенно в прилегающем к нему бланкете.

- Экспоненциальная зависимость радиальных распределений скоростей радиационного захвата нейтронов на ядрах ^{238}U означает сильную пространственную неоднородность накопления ^{239}Pu в окружающем топливе.
- Верификация кодов для расчета нуклон-нуклонных взаимодействий и транспорта частиц – важная фундаментальная задача, без решения которой невозможно проектирование полномасштабной реакторной установки, управляемой внешним источником.
- В процессе деления урана в бланкете установки доминирующую роль играют реакции, индуцированные нейтронами. Однако, как предполагается, промышленная установка по трансмутации РАО и электро-ядерному способу получения энергии будет иметь коэффициент подкритичности 0,95-0,98. В этом случае необходимо учитывать вклад реакций деления, индуцированных заряженными пионами, гамма-квантами и протонами.

Рекомендации по практическому использованию результатов:

1. Полученные в результате исследований наборы экспериментальных величин (распределения и значения скоростей деления ядер, радиационного захвата нейтронов, спектральных индексов) могут быть использованы и использовались для тестирования компьютерных кодов и ядерно-физических констант, применяемых при расчетах параметров управляемых ускорителем систем (*ADS*), являющихся прототипами подкритических реакторных систем для производства энергии и трансмутации РАО. Данные результаты существенно дополняют базу экспериментальных ядерных данных для *ADS*.
2. Разработанные в ходе работы над диссертацией методики измерения нейтронно-физических характеристик подкритических сборок (прототипов перспективных реакторных систем пятого поколения для получения энергии и трансмутации РАО) могут быть использованы в Республике Беларусь (ОИЭЯИ-Сосны НАН Беларуси) при проведении экспериментов на подкритических сборках (вне зависимости от их материального состава) в рамках государственных и международных исследовательских программ.
3. Разработанные в ходе работы над диссертацией методики определения параметров пучков первичных частиц и определения спектрального индекса $\sigma_{\text{суп}} / \sigma_f$ использовались в экспериментах на подкритических сборках в ЛФВЭ ОИЯИ (Дубна), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах:

1. Potapenko, A.S. Calibration of track detectors for fission rate determination: an experimental and theoretical study /M.I. Krivopustov, S.R. Hashemi-Nezhad, A.S. Potapenko, Igor Zhuk // Nuclear Instrument and Methods. – 2006. – No. A568. – P. 816-825.
2. Потапенко, А.С. Нейтронные характеристики уран-свинцовой сборки при облучении её дейтронами с энергией 2,52 ГэВ / А.С. Потапенко, И.В. Жук, В.А. Воронко, С.Р. Хашеми-Незад, М.И. Кривоустов // Вести НАНБ. Сер. физ.-техн. наук. – 2006. – Том №5. – С. 82–85.
3. Потапенко, А.С. Нейтронные характеристики уран-свинцовой сборки бомбардируемой релятивистскими дейтронами /А.С. Потапенко, И.В. Жук, В.А. Воронко, В.В. Сотников, В.В. Сидоренко, С.Р. Хашеми-Незад, М.И. Кривоустов, П.С. Кизим // Вестник Харьковского Национального Университета – серия физическая – ядра, частицы, поля. – 2006. – Выпуск 4 /32. – С. 75–81.
4. Potapenko, A. Determination of high-energy deuteron beam profile and spatial distribution of high-energy neutrons in a U/Pb assembly under 1.26 GeV/nucleon deuteron irradiation /A. Potapenko, I. Zhuk, S.R. Hashemi-Nezhad and M.I. Krivopustov // Radiation Measurement. –2008. – Vol. 43. – P. 199–203.
5. Potapenko, A.S. Determination of Uranium Fission Rate in an Arbitrary Neutron Field Using the Fission Track Detectors / A.S. Potapenko, S.R. Hashemi-Nezhad, I. V. Zhuk , and M.I. Krivopustov// Radiation Measurement. –2008. – Vol. 43. – P. 209–213.
6. Potapenko, A.S. Determination of high-energy proton beam profile using track detectors / I. V. Zhuk , S.R. Hashemi-Nezhad, A.S. Potapenko and M.I. Krivopustov// Radiation Measurement. –2008. – Vol. 43. – P. 219-224.
7. Потапенко, А.С. Экспериментальное определение сечений реакций деления (d,f) на Уест , Рвест при энергии дейтронов 1,6 ГэВ / А.С. Потапенко, С.Р. Хашеми-Несхад, И.В. Жук, В.А. Воронко, М.И. Кривоустов // Приложение к журналу Вести НАН Беларуси, часть 3, серия физ.-тех. наук, – 2008. – С. 94–98.
8. Потапенко, А.С. Генерация нейтронов в уран-свинцовой сборке при облучении дейтронами с энергией 1.6 и 2.52 ГэВ /А.С. Потапенко, В.А. Воронко, В.В. Сотников, В.В. Сидоренко, В.В. Жук, И.В. Жук, М.И. Кривоустов, С.Р. Хашеми-Несхад, П.С. Кизим // ВАНТ. – 2008. –№5. С. 174-178.
9. Калибровка трековых детекторов для определения скорости реакции деления свинца / И.В. Жук, А.С. Потапенко, М.И. Кривоустов //

Материалы международных и республиканских конференций:

10. Potapenko, A. Investigation of neutron generation in the Uranium-Lead assembly of electronuclear setup “Energy plus Transmutation” bombarded by deuteron with energy 2.52 GeV / S.R. Hashemi-Nezhad, I. V. Zhuk , and M.I. Krivopustov //XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problem: Proceeding of International Seminar, Dubna, 10-15 Sept. 2008. / JINR, Dubna; editor: A.N.Sisakyan [eds.] – Dubna, 2009. – Vol. 1. – P. 214–222.

11. Potapenko, A. Studies on fission of U and Pb in spallation neutron field of “Energy plus transmutation” setup. / S.R. Hashemi-Nezhad, I. V. Zhuk , and M.I. Krivopustov //XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problem: Proceeding of International Seminar, Dubna, 10-15 Sept. 2008. / JINR, Dubna; editor: A.N.Sisakyan [eds.] – Dubna, 2009. – Vol. 1. – P. 240–249.

Препринты:

12. Krivopustov, M.I. About the first experimental investigation of neutron production and transmutation of ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu on Pb-target with U-blanket “Energy plus transmutation” setup irradiated by 2.52 GeV deuterons / M.I. Krivopustov [et.al] – Dubna, 2007. – 30 p. (Preprint: JINR-Communication E1-2007-7).

13. Potapenko, A.S. Calibration of track detectors for fission rate determination: an experimental and theoretical study / A.S. Potapenko, R.S. Hashemi-Nezhad, I.V. Zhuk, M.I.Krivopustov. – Dubna, 2006. – 17 p. (JINR-Communication E1-2006-54).

РЕЗЮМЕ

Потапенко Андрей Сергеевич

Нейтронно-физические характеристики подкритической сборки с бланкетом из естественного урана, управляемой ускорителем

Ключевые слова: *ADS* (система, управляемая ускорителем), подкритическая сборка, пространственно-энергетическое распределение нейтронов, твердотельный трековый детектор, спектральный индекс, скорость деления.

Цель работы: Определить экспериментально и рассчитать методом Монте-Карло пространственные распределения скоростей реакций по объему подкритической сборки, управляемой ускорителем.

В качестве основной экспериментальной техники использовался метод твердотельных трековых детекторов ядер (ТТДя). ТТДя методика измерения абсолютных скоростей реакций деления адаптирована для применения к условиям *ADS* – рассмотрено влияние на показания сенсоров ТТДя кинематических эффектов и эффектов, возникающих при процессе высокоэнергетического деления. Вычислены соответствующие поправки. В качестве трековых детекторов использовались искусственная слюда и лавсан.

Эксперименты проводились на ускорителе «Нуклотрон» Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ (г. Дубна, РФ).

В результате проведенных экспериментов для вышеуказанной подкритической системы получены распределения скоростей деления ^{235}U , ^{238}U и $^{238}\text{U}(n, \gamma)$, а также скорости реакции радиационного захвата $^{238}\text{U}(n, \gamma)$, а также спектральных индексов $\frac{\sigma_f^{238U}}{\sigma_f^{235U}}$ и $\frac{\sigma_f^{238U}}{\sigma_c^{238U}}$. Распределения спектральных индексов, указывают на следующие закономерности: спектр нейтронов смягчается от оси к периферии сборки; близкие значения спектральных индексов свидетельствуют о том, что спектр нейтронов не изменяется (или слабо зависит) от энергии и типа первичных частиц; значительная доля ультрабыстрых нейтронов покидает мишень без взаимодействий.

Выполнено сравнение экспериментальных величин с результатами расчетов методом Монте-Карло с использованием компьютерного кода *FLUKA*.

Область применения: Полученные экспериментальные величины являются интегральными ядерными данными, которые могут быть использованы для тестирования компьютерных кодов и ядерно-физических констант, применяемых для расчетов параметров реакторных систем, управляемых внешним источником.

Патапенка Андрэй Сяргеевіч

Нейтронна-фізічныя характарыстыкі падкритической зборкі з бланкетам з натуральнага ўрана, якая кіруецца паскаральнікам

Ключавыя словы: *ADS* (сістэма, якая кіруецца паскаральнікам), падкрытычная зборка, прасторава-энергетычнае размеркаванне нейтронаў, цвёрдацельны трэкавы дэтэктар, спектральны індэкс, хуткасць дзялення.

Мэта працы: Вызначыць эксперыментальна і разлічыць метадам Монтэ-Карла прасторавыя размеркаванні хуткасцяў рэакцый па аб'ёме падкрытычнай зборкі, кіраванай паскаральнікам.

У якасці асноўнай эксперыментальнай тэхнікі выкарыстоўваўся метад цвёрдацельных трэкавых дэтэктараў ядраў (ЦТДя). ЦТДя методика вымярэння абсалютных хуткасцяў рэакцый дзялення адаптаваная для ўжывання да ўмоў *ADS* – разгледжаны ўплыў на сведчанні сэнсараў ЦТДя кінематычных эфектаў і эфектаў, якія ўзнікаюць пры працэсе высокаэнергетычнага дзялення. Вылічаны адпаведныя папраўкі. У якасці трэкавых дэтэктараў выкарыстоўваліся штучны лушчак і лаўсан.

Эксперыменты праводзіліся на паскаральніку «Нуклотрон» Лабараторыі фізікі высокіх энергій АІЯД (г. Дубна, РФ).

У выніку праведзеных эксперыментаў для вышэйпазначанай падкрытычнай сістэмы атрыманы размеркаванні хуткасцяў дзялення ^{235}U , ^{238}U і ^{238}Pu , хуткасці рэакцыі радыяцыйнага захопу $^{238}\text{U}(n, \gamma)$, а таксама спектральных індэксаў $\frac{\overline{\sigma}_f^{238U}}{\overline{\sigma}_f^{235U}}$ і $\frac{\overline{\sigma}_f^{238U}}{\overline{\sigma}_c^{238U}}$. Размеркаванні спектральных індэксаў, паказваюць на наступныя заканамернасці: спектр нейтронаў мякчэе ад восі да перыферыі зборкі; блізкія значэнні спектральных індэксаў сведчаць аб тым, што спектр нейтронаў не змяняецца (або слаба залежыць) ад энергіі і тыпу першасных часціц; значная частка ультрабыстрых нейтронаў пакідае мішэн без узаемадзеянняў.

Выканана параўнанне эксперыментальных велічынь з вынікамі разлікаў метадам Монтэ-Карла з выкарыстаннем кампутарнага кода *FLUKA*.

Вобласць ужывання: Атрыманыя эксперыментальныя велічыні з'яўляюцца інтэгральнымі ядзернымі дадзенымі, якія могуць быць скарыстаныя для тэставання кампутарных кодаў і ядзерна-фізічных канстант, якія ужываюцца для разлікаў параметраў рэактарных сістэм, кіраваных знешняй крыніцай.

SUMMARY

Patapenka Andrei Syargeevich

Neutron-physical characteristics of the subcritical setup with natural uranium blanket, driven by accelerator

Keywords: ADS (accelerator driven system), subcritical setup, spatial and energy distribution of neutrons, solid state track detector, spectral index, fission rate.

The purpose of this work experimental determination and theoretical calculation (using Monte-Carlo method) of reaction rates spatial distributions in the volume of subcritical assembly driven by particle accelerator.

The method of solid-state track detectors was used as the main experimental technique. SSNTD technique for fission rates measurement was adapted for ADS conditions: Influences of kinematic effects and the effects arising from high-energy fission processes are considered to adjust calibration factor of SSNTD. Artificial mica and lavesan were used as track detectors.

Experiments were carried out at the "Nuclotron" accelerator in the Laboratory of high energy physics, JINR (Dubna, Russia).

Spatial distributions of fission reaction rates for ^{235}U , ^{238}U and $^{\text{nat}}\text{Pb}$, and radiating capture reaction rate $^{238}\text{U} (n, \gamma)$ and also spectral indexes $\frac{\sigma_f^{238\text{U}}}{\sigma_f^{235\text{U}}}$, $\frac{\sigma_f^{238\text{U}}}{\sigma_c^{238\text{U}}}$ were obtained as the result of the experiments on the subcritical system. Distributions of spectral indexes specify that: the neutron spectrum is softened from the axis to the periphery; the same values of spectral indexes testify that the neutron spectrum does not change (or poorly depends) on energy and type of primary particles; the considerable part of ultrafast neutrons leaves the target without interactions.

Comparison of experimental values with the result of Monte-Carlo calculations is also performed. Calculation was done with FLUKA code.

Scope: Obtained experimental values are the integrated nuclear data, which can be used to verify computer codes and nuclear databases to calculate parameters perspective reactors driven by external source.

ПАТАПЕНКА А.С.



Научное издание

ПОТАПЕНКО
Андрей Сергеевич

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ С БЛАНКЕТОМ ИЗ
ЕСТЕСТВЕННОГО УРАНА, УПРАВЛЯЕМОЙ УСКОРИТЕЛЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Подписано в печать 14.02.2011. Формат 60x84₁₆.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Отпечатано на ксероксе.

Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 70 экз. Заказ № 1.

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
НАН Беларуси 220109, г. Минск, ул. Академика А.К. Красина, 99