



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи
УДК 539.14

Т-45

ТИТАРЕНКО
Юрий Ефимович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МИШЕНЕЙ И БЛАНКЕТОВ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК.**

Специальность: 01.04.16 - Физика ядра и элементарных частиц.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук.

Дубна 2001

Работа выполнена в ГУП ГНЦ РФ "Институт теоретической и экспериментальной физики", г. Москва.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

КОРОВИН
Юрий Александрович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

УЛИН
Сергей Евгеньевич

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

БОНДАРЕВ
Владимир Константинович

Исходящая организация:

ГУП ГНЦ РФ
"Физико-энергетический
институт", г. Обнинск

Защита диссертации состоится "17" мая 2001 г. в "15" часов на заседании

диссертационного совета Д 720.001.02 Объединенного института ядерных исследований

при Лаборатории высоких энергий, 141980, г. Дубна Московской области

к. т. ерещенко ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "26" мая 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

М. Ф. Лихачев

Лихачев М.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Проблемы экологии и радиационной безопасности в настоящее время стали весьма существенными для промышленно развитых стран. В ряду этих проблем особо важное место занимают вопросы безопасного обращения с радиоактивными отходами, а также с облученным топливом ядерных реакторов. По оценке МАГАТЭ, современные хранилища содержат ~100000 т облученного топлива только энергетических реакторов. Принимая во внимание, что в качестве таковых наиболее распространены реакторы типа PWR (ВВЭР), приблизительный состав хранимого облученного топлива представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав хранимого облученного топлива

Нуклид	Облученное топливо, через 20 лет после выгрузки из реактора		
	Загружаемое Топливо	Отн. содержание, (масс. %)	Содержание, (т)
^{235}U	3.2	0.7	700
^{238}U	96.8	94.4	94400
Pu	-	0.9	900
Np+Am+Cm	-	0.16	160
Продукты деления, в том числе:	-	3.6	3600
^{137}Cs	-	0.09	90
^{90}Sr	-	0.04	40
^{129}I	-	0.03	30
^{99}Tc	-	0.09	90

Очевидно, что дальнейшее развитие ядерной энергетики во многом зависит от решения проблемы безопасной утилизации уже произведенных отходов и тех

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

отходов, которые она будет производить в процессе дальнейшего развития. Рассматривается несколько способов решения этой проблемы.

Наиболее традиционный способ заключается в разработке способов длительного содержания высокорadioактивных материалов в специальных хранилищах и, соответственно, откладывания проблемы их уничтожения (либо частичного использования) на будущие поколения. Так, в США такое подземное хранилище планируется создать в штате Невада в местечке Yucca Mountain, где предполагается содержание ~ 70000 тонн высокорadioактивных материалов.

Альтернативный подход, получивший развитие в последние годы, заключается в стремлении создать технологии ядерной переработки (ядерной трансмутации) высокорadioактивных материалов в стабильные или короткоживущие нуклиды, тем самым избавляя будущие поколения от необходимости решения этой проблемы.

В настоящее время две концепции ядерной трансмутации представляются наиболее перспективными. Первая концепция основана на использовании быстрых реакторов, развитая технология которых позволит начать их использование в качестве трансмутационных установок, вероятно, без значительных первоначальных затрат.

Вторая концепция основывается на создании ядерно-энергетических установок принципиально нового типа - электроядерных (ЭЛЯУ), в состав которых входят: сильноточный ускоритель протонов с энергией ~ 1 ГэВ и током более 0.1 А, мишенный комплекс, в котором при взаимодействии протонов с веществом мишени осуществляется генерация нейтронов с множественностью ~ 20 нейтрон/протон, и подкритический бланкет, в котором и протекают трансмутационные реакции. Концептуальные разработки настоящего времени (OMEGA, Япония; ATW, США; GEDEON, Франция; КОМАС, Юж. Корея) предполагают, что реализация такой идеи будет наиболее эффективна в рамках единого производственного цикла, объединяющего три основные технологии:

- химического разделения радиоактивных материалов;
- получения высокоэнергетических пучков протонов большой мощности;
- реакторной техники, с существенным расширением области энергий нейтронов (вплоть до энергии ~ 1 ГэВ), для создания комплекса мишень-бланкет.

Химическая технология рассматривает четыре основных пирохимических процесса сепарации отходов и два гидрометаллургических процесса. При этом пирохимическим процессам отдается предпочтение перед водными, поскольку они устойчивее к режиму нераспространения

Ускорительная технология, используя предшествующий опыт, предлагает несколько концепций упомянутых выше сильноточных протонных ускорителей, мощность которых достигнет сотен МВт. Характерной чертой этих концепций является стремление снизить долю потерянных частиц, с целью удовлетворения требований их радиационно-безопасной эксплуатации. Эти потери не должны превосходить 0.2 нА/м (т.е. относительные потери должны быть на уровне 10^{-5} - 10^{-6}).

Развитая реакторная технология, используя различные замедлители, позволяет создать подкритический бланкет с любым нейтронным спектром, от быстрого до теплового. Однако увеличение σ/σ_0 с ростом энергии нейтронов для минорных актинидов и Pu, достаточно высокие пороги деления для некоторых из них (^{237}Np , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{243}Am , ^{246}Cm) обуславливают преимущество бланкетов с "быстрым" спектром нейтронов. Наиболее часто реализация "быстрых" систем осуществляется с использованием жидкометаллического теплоносителя - Na. Однако эвтектика Pb-Bi в данном случае предпочтительнее натрия, так как она может использоваться как мишенный материал (при её взаимодействии с пучком протонов), так и в качестве теплоносителя. Прогресс Pb-Bi - технологии, достигнутый при создании реакторных установок российских подводных лодок, обуславливает ее перспективность в качестве основной технологии ЭЛЯУ. Выбор современной технологии разделения плутония, минорных актинидов и продуктов деления предполагает использование в таких установках металлического топлива. Оно существенно отличается от топлива, используемого в традиционной программе быстрых реакторов. В частности, чтобы обеспечить высокие уровни выгорания, в него вводится высокое количество циркония (80-85% Zr + 20-15% Pu, Am, Cm, Np).

В качестве альтернативного варианта рассматривается концепция бланкета с расплавом солей (например, $0.52\text{NaF}+0.48\text{ZrF}_4$).

Однако при всем концептуальном разнообразии возможных конструкций мишенного комплекса и бланкета ЭЛЯУ можно выделить основную проблему, возникающую при их проектировании и практической реализации. Речь идет об отсутствии и/или недостаточной точности требуемых для этого ядерных данных и результатов интегральных экспериментов, что обусловлено в первую очередь существенным расширением рассматриваемого энергетического диапазона (вплоть до ~ 1.0 ГэВ).

В частности, для такого важнейшего узла ЭЛЯУ, как мишенный комплекс, требуется расчетный прогноз целого ряда принципиально новых, по сравнению с традиционными реакторными технологиями, параметров:

- нейтронный выход из мишени;
- спектр нейтронов внутри мишени и на ее поверхности;
- нейтронная "прозрачность" мишени;
- параметры энергвыделения мишени;
- выходы продуктов реакций в мишени;
- радиационная стойкость конструкционных материалов комплекса.

Эти параметры непосредственно влияют на основные характеристики подкритического бланкета, определяющие ядерную безопасность электроядерных установок в целом, как-то: K_{eff} ; эффективность системы СУЗ; поля энергвыделения ТВС; скорость трансмутации минорных актинидов, определяемая как целевой функционал.

В связи с вышесказанным **цель диссертационной работы** состоит в:

- измерении ядерных констант мишенного комплекса и бланкета, имеющих первостепенное практическое значение;
- верификации существующих расчетных программ, используемых для получения требуемых при проектировании ЭЛЯУ ядерных данных;
- проведении интегральных экспериментов для прототипов узлов и конструкций ЭЛЯУ и сравнении их результатов с расчетными данными.

Для достижения данной цели **решались следующие задачи**:

- формирование измерительного комплекса и разработка экспериментальных методик, привлечение современных баз ядерных данных;

- наработка экспериментальных значений выходов продуктов ядерных реакций для важнейших мишенных и конструкционных материалов при их облучении протонами различных энергий;

- наработка экспериментальных значений активности и мощности дозы для важнейших мишенных и конструкционных материалов при их облучении протонами различных энергий;

- измерение абсолютных скоростей пороговых нейтронных реакций на внешней поверхности «толстой» вольфрамовой мишени при облучении ее протонами;

- верификация программ, используемых для расчета микроскопических сечений взаимодействия протонов различных энергий с мишенными и конструкционными материалами ЭЛЯУ - ^{209}Bi , ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb , $^{\text{nat}}\text{Pb}$, ^{65}Cu , ^{63}Cu и ^{59}Co ;

- верификация программ, используемых для расчета интегральных параметров мишенных устройств;

- модернизация критического стенда МАКЕТ для проведения экспериментов с микро моделью тяжеловодного бланкета;

- исследование резонансного поглощения нейтронов в тяжеловодном растворе ^{237}Np ;

- исследование скоростей важнейших реакций в микро модели тяжеловодного ториевого бланкета.

Достижение поставленных целей осуществлялось с использованием следующих **методических приемов**:

- метода прямой γ -спектрометрии облученных образцов без химической сепарации;

- использования высокообогащенных по исследуемому изотопу образцов;

- межлабораторного сравнения экспериментальных результатов;

- применения современных расчетных программ, использующих различные ядерные модели.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- существенно усовершенствована методика γ -спектрометрических измерений сложных смесей радионуклидов, обеспечивающая измерение значительного

количества выходов продуктов ядерных реакций с периодом полураспада от 10 минут до 30 лет;

- впервые получены значения независимых и кумулятивных выходов для основных изотопов свинца и природного свинца, изотопов меди, а также для висмута и кобальта (^{209}Bi , ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb , $^{\text{nat}}\text{Pb}$ и ^{65}Cu , ^{63}Cu , ^{59}Co) при энергиях протонов, соответствующих реальным энергиям ЭЛЯУ;

- впервые измерены абсолютные значения скоростей пороговых реакций на внешней поверхности вольфрамовой мишени при облучении ее протонами с энергией 1 ГэВ;

- впервые, используя наборы экспериментальных данных, полученные в этой работе, оценена предсказательная способность 14-ти расчетных программ, применяемых в мировой практике для расчета характеристик ЭЛЯУ;

- впервые проведены исследования резонансного поглощения нейтронов в тяжеловодном растворе ^{237}Np ;

- впервые проведены измерения скоростей важнейших реакций ториевого топливного цикла в микромодели тяжеловодного ториевого бланкета и оценена величина относительного накопления $^{232}\text{U}/^{233}\text{U}$ для нее;

- впервые проведено сравнение относительной предсказательной способности 2-х традиционных программ для расчета реакторов (MCU, TRIFON-TRECD) и 4-х расчетных программ, используемых в физике высоких энергий (CASCADE, LANET, SEM-95, INUCL) для областей энергий нейтронов $0.025 \text{ эВ} < E_n < 20 \text{ МэВ}$ и $20 \text{ МэВ} < E_n < 1 \text{ ГэВ}$.

Практическая ценность работы определяется тем, что ее результаты могут быть использованы:

- при формировании современных библиотек ядерных данных (EXFOR, NSR) для протонных реакций в малоизученных областях энергий;

- в прикладных научных исследованиях для проектирования мишенного комплекса и бланкета ЭЛЯУ и оптимизации их ядерно - физических характеристик и эксплуатационных режимов;

- при модернизации вычислительных программ, используемых для расчетов ЭЛЯУ;

- в фундаментальных исследованиях для усовершенствования ядерных моделей и развития теории ядерных реакций;

- в смежных областях фундаментальных и прикладных исследований (космология, космическая техника, физика и техника заряженных частиц).

Положения и результаты, выносимые на защиту:

- методика и результаты γ -спектрометрических измерений выходов продуктов ядерных реакций с периодом полураспада от 10 минут до 30 лет для ^{209}Bi , ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb , $^{\text{nat}}\text{Pb}$ и ^{65}Cu , ^{63}Cu , ^{59}Co при энергиях протонов 0.13 ГэВ, 1.0 ГэВ, 1.2 ГэВ, 1.5 ГэВ;

- результаты межлабораторного сравнения экспериментальных результатов для ^{63}Cu и ^{65}Cu при энергии протонов 1.2 ГэВ;

- результаты сравнения полученных значений выходов с данными других авторов;

- результаты измерений абсолютных значений скоростей пороговых реакций на внешней поверхности «толстой» вольфрамовой мишени при облучении ее протонами с энергией 1 ГэВ;

- оценка предсказательных способностей 14-ти вычислительных программ, применяемых в мировой практике для расчета реальных характеристик ЭЛЯУ;

- методика и результаты измерений абсолютной мощности критического стэнда «МАКЕТ»;

- методика и результаты измерений резонансного поглощения нейтронов в тяжеловодном растворе ^{237}Np ;

- методика и результаты измерений скоростей важнейших реакций ториевого топливного цикла в микромодели тяжеловодного ториевого бланкета и оценка величины относительного накопления $^{232}\text{U}/^{233}\text{U}$;

- результаты сравнения предсказательной способности различных расчетных программ в областях энергий нейтронов $0.025 \text{ эВ} < E_n < 20 \text{ МэВ}$ и $20 \text{ МэВ} < E_n < 1 \text{ ГэВ}$.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на:

1. II International Seminar on Proton Accelerator Based Transmutation of Long-Lived Radioactive Wastes and Utilization of Weapon Plutonium (Moscow, Russia, May 23-27, 1994);

2. Workshop on Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Wastes: Problems, Perspectives, Cooperative Research (Dubna, Russia, May 29-31, 1996);
3. Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications (Kalmar, Sweden, June 3-7, 1996);
4. XI Международном семинаре по точным измерениям в ядерной спектрометрии (Саров, 2-6 сентября, 1996);
5. 4th International Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation (Sep. 11-13, 1996, Mito, Japan);
6. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, Italy, May 19-24, 1997);
7. IAEA Consultancy on preparation of a data base of existing and planned experimental facilities for accelerator driven system related R&D (ITEP, Moscow, Russian Federation, 24-27 June, 1997);
8. International Atomic Energy Agency Technical Committee Meeting on Feasibility and Motivation for Hybrid Concepts for Nuclear Energy Generation and Transmutation (Madrid, Spain, 17-19 Sept., 1997);
9. 3rd Specialists' Meeting on High Energy Nuclear Data, JAERI, Tokai, Ibaraki-ken, Japan (March 30-31, 1998);
10. 2-nd International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98) (Gatlinburg, TN, USA, Sept. 20-23, 1998);
11. Heavy Liquid Metal Coolant in Nuclear Technologies Conference, HLMC'98 (October 5-9, 1998, Obninsk, Russia);
12. 3-rd - International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications (Praha, June 7-11, 1999);
13. Международной конференции по Электроядерным системам в перспективной ядерной энергетике (Москва, 11-15 октября 1999);
14. 3rd International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'99) (Long-Beach, CA, USA, Nov. 14-18, 1999);
15. Specialists Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities (SATIF-5) (Paris, France, 20-21 July 2000);
16. XI семинаре по проблемам физики реакторов (Москва, 4-8 сентября, 2000);
17. XV международном симпозиуме по физике деления ядер (Обнинск, 2-5 октября 2000).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 научных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем текста, включая рисунки и список литературы, состоящий из 265 наименований, составляет 245 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе рассматриваются возможные способы уничтожения долгоживущих радиоактивных материалов, представлена перспективная принципиальная схема ЭЛЯУ, обсуждаются физические и технические аспекты, возникающие при разработке ее основных узлов - ускорителя, мишенного комплекса и подкритического blankets.

Обосновано утверждение о недостаточности информации о ядерных данных для рассматриваемой области энергий.

Разработаны методики экспериментального определения ядерных данных в требуемых областях энергий и масс ядер. Особое внимание обращено на ядерные данные и физические параметры, имеющие наибольшее практическое значение, а именно:

- выходы (сечения) продуктов ядерных реакций в тонких мишенях;
- активности облученных мишеней и значения мощностей доз их γ -излучения;
- абсолютные значения пороговых скоростей реакций на внешней поверхности «толстой» вольфрамовой мишени;
- критические композиции и эффекты реактивности в blankets ЭЛЯУ;
- абсолютные значения скоростей реакций в микромодели тяжеловодного blankets ЭЛЯУ.

Формализм представления и разработка методики экспериментального определения выходов (сечений) продуктов реакций основан на том, что любой из регистрируемых продуктов реакций, образующихся при взаимодействии протонов различных энергий с веществом, может образовываться двумя путями: непосредственно в ходе исследуемой реакции и при распаде "генетических" предшественников. В этом случае изменение концентрации двух любых образующихся в процессе облучения мишени «генетически» связанных радионуклидов ($N_1 \xrightarrow{\lambda_1} N_2 \xrightarrow{\lambda_2}$) можно представить в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих их образование и распад.

Измерения выходов для тонких мишеней в данной работе выполнялись относительным методом с использованием прямой γ -спектрометрии и реакции

$^{27}\text{Al}(\rho, x)^{24}\text{Na}$ в качестве мониторинговой. С учетом этого, введя формальное представление временных функций типа $F_i(t, T) = (1 - e^{-\lambda_i t}) \frac{1 - e^{-\lambda_i T}}{1 - e^{-\lambda_i T}}$ ($i = 1, 2, \text{Na}$; τ - длительность протонного импульса ускорителя, T - период следования импульсов, k - число импульсов за время облучения), характеризующих распад нуклидов за время облучения, и выразив, как это принято в относительных измерениях, величину флюенса протонов через сечение мониторинговой реакции - $\sigma_{\text{ст}}$, определяемые величины можно представить в виде

$$\sigma_1^{\text{cum}} = \frac{A_0}{\eta_1 \varepsilon_1 F_1 N_{\text{Na}}} \cdot \frac{N_{\text{Al}} \cdot F_{\text{Na}}}{N_T \lambda_{\text{Na}}} \cdot \sigma_{\text{ст}} \quad (1)$$

$$\sigma_1^{\text{cum}} = \frac{A_1}{v_1 \eta_2 \varepsilon_2 F_1 N_{\text{Na}}} \cdot \frac{N_{\text{Al}} \lambda_2 - \lambda_1 F_{\text{Na}}}{N_T \lambda_2 \lambda_{\text{Na}}} \cdot \sigma_{\text{ст}} \quad (2)$$

$$\sigma_2^{\text{ind}} = \left(\frac{A_2}{F_2} + \frac{A_1 \lambda_1}{F_1 \lambda_2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_1 \varepsilon_1 N_{\text{Na}}} \cdot \frac{N_{\text{Al}} \cdot F_{\text{Na}}}{N_T \lambda_{\text{Na}}} \cdot \sigma_{\text{ст}} \quad (3)$$

$$\sigma_2^{\text{cum}} = \sigma_2^{\text{ind}} + v_1 \cdot \sigma_1^{\text{cum}} = \left(\frac{A_1}{F_1} + \frac{A_2}{F_2} \right) \cdot \frac{1}{\eta_1 \varepsilon_1 N_{\text{Na}}} \cdot \frac{N_{\text{Al}} \cdot F_{\text{Na}}}{N_T \lambda_{\text{Na}}} \cdot \sigma_{\text{ст}} \quad (4)$$

где σ_1^{cum} - кумулятивное сечение (выход) первого нуклида; σ_2^{ind} и σ_2^{cum} - независимое и кумулятивное сечения (выходы) второго нуклида; N_{Al} , N_T - число ядер в мониторе (стандарте) и в экспериментальном образце; N_{Na} - число ядер ^{24}Na , образовавшихся в мониторе; η_1 и η_2 - абсолютные квантовые выходы γ -линий; ε_1 и ε_2 - эффективности регистрации спектрометра в пиках полного поглощения для энергий γ -квантов E_1 и E_2 (в дальнейшем - эффективности); v_1 - коэффициент ветвления схемы распада первого нуклида; λ_1 , λ_2 , λ_{Na} - постоянные распада для первого и второго нуклида и ^{24}Na , соответственно; A_0 , A_1 , A_2 - численные коэффициенты, определяемые фитированием экспериментальных значений скоростей счета в пиках полного поглощения при энергиях E_1 и E_2 .

В экспериментах использовался γ -спектрометр на базе IBM PC с детектором GC2518, разрешение которого для γ -линии 1332 кэВ ^{60}Co составляло 1.8 кэВ.

Для облучения применялись высокообогащенные по исследуемому нуклиду экспериментальные образцы, близкие к моноизотопным и представляющие собой металлические диски диаметром 10.5 мм и толщиной 0.1-0.4 мм. При таких толщинах образцов доля вторичных процессов пренебрежимо мала. В качестве мо-

ниторов использовались Al-фольги идентичного диаметра и толщины. Содержание химических примесей в Al не превышало 0.001%.

Облучения выполнялись на двух независимо выводимых внешних протонных пучках синхротрона ИТЭФ У-10, с указанными ниже параметрами:

- высокоэнергетичный, обеспечивающий вывод протонного пучка в диапазоне 800 - 2600 МэВ (имеет сечение в форме эллипса с осями $\sim 20 \times 12$ мм, интенсивность $\sim 2 \cdot 10^{11}$ протонов в импульсе, скорость следования импульсов $\sim 16 \text{ мин}^{-1}$, длительность импульса ~ 0.5 с);

- низкоэнергетичный, обеспечивающий вывод протонного пучка в диапазоне 70 - 200 МэВ (имеет сечение в форме круга диаметром ~ 30 мм, интенсивность $\sim 5 \cdot 10^9$ протонов в импульсе, скорость следования импульсов $\sim 16 \text{ мин}^{-1}$, длительность импульса ~ 100 нс).

В ходе измерений были проведены дополнительные исследования, направленные на снижение погрешностей получаемых результатов, а именно:

- уточнение нейтронной составляющей в выводимых протонных пучках;
- уточнение сечения используемой мониторинговой реакции $^{27}\text{Al}(\rho, x)^{24}\text{Na}$;
- исследование зависимости эффективности регистрации γ -спектрометра от геометрии расположения измеряемого облученного образца;
- оптимизация программ обработки γ -спектров.

Результаты измерений нейтронной составляющей в выводимых протонных пучках представлены на рис. 1,2; сечения используемой мониторинговой реакции - на рис. 3; высотно-энергетическая зависимость - на рис. 4.

Аналитическое представление зависимости эффективности регистрации спектрометра от высоты и энергии выражено в виде формулы

$$\varepsilon(E, H) = \varepsilon_{\text{base}}(E) \cdot \left[\frac{(q_1 + q_2 \cdot \ln E + H_{\text{base}})}{(q_1 + q_2 \cdot \ln E + H)} \right]^2 \quad (5),$$

где q_1 , q_2 - параметры, определяемые фитированием экспериментальных результатов.

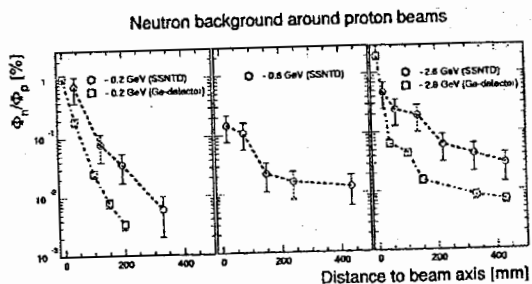


Рис. 1. Нейтронный фон вокруг выводимых протонных пучков, используемых для облучения «тонких» экспериментальных образцов.

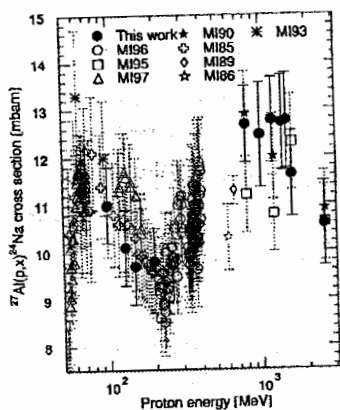
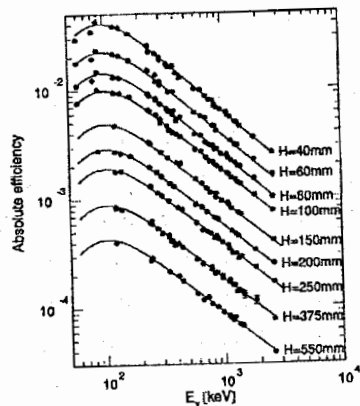


Рис. 3. Значения сечений мониторинговой реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$.

Рис. 4. Экспериментальные значения и расчетное моделирование эффективности регистрации спектрометра.



Анализ программ обработки γ -спектров продемонстрировал преимущество программы GENIE-2000 с интерактивным режимом подгонки пиков, обеспечивающим отображение на экране монитора нормализованной разности между данными и подгонкой, что позволяет корректировать результаты автоматической обработки.

Погрешности полученных значений выходов продуктов протонных реакций лежат в пределах (10-35)%. Поскольку в большинстве случаев представленные

результаты получены усреднением нескольких значений выходов ($\sigma \pm \Delta\sigma_i$), определенных по различным γ -линиям, то их средние значения и экспериментальные погрешности вычислялись по формулам:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i W_i}{\sum W_i}, \text{ где } W_i = 1/\Delta\sigma_i^2, \quad (6)$$

$$\Delta\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum W_i (\bar{\sigma} - \sigma_i)^2}{(n-1) \sum W_i}}, \quad (7)$$

$$\Delta\bar{\sigma}^n = \sqrt{\frac{1}{\sum W_i}}. \quad (8)$$

В окончательных результатах в качестве экспериментальной погрешности $\bar{\sigma}$ принималось наибольшее из значений $\bar{\sigma}'$ и $\bar{\sigma}''$. Полная погрешность измеряемых выходов, представленных выше, с учетом погрешности монитора вычислялась по формуле

$$\frac{\Delta\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma_{st}}{\sigma_{st}}\right)^2}. \quad (9)$$

Погрешности независимых и кумулятивных выходов продуктов реакций для отдельных γ -линий $\Delta\sigma_i$ вычисленные с использованием выражений (1) - (4), определялись с использованием формулы переноса ошибок. Как показывает анализ, основной вклад в полную погрешность вносят неопределенности значений используемых ядерных данных - абсолютных квантовых выходов и сечений мониторинговых реакций. Сводка полученных результатов представлена в табл. 2.

С целью дополнительной проверки достоверности полученных результатов было организовано их межлабораторное сравнение. Образцы $^{63,65}\text{Cu}$, одновременно облученные в идентичных условиях на ускорителе ИТЭФ, были измерены независимо в ИТЭФ и в Японском институте ядерно-энергетических исследований (JAERI). Результаты сравнения, выполненные с использованием «критерия согласия» $\langle F \rangle$ (см. формулу 11) представлены в виде их статистических распределений (гистограмм) на рис. 4. Они свидетельствуют о хорошем согласии значений выходов продуктов реакций, полученных в обеих лабораториях.

Таблица 2

Число выходов продуктов реакций, измеренных в каждом эксперименте

Мишень	Энергия протонов (ГэВ)				Число измеренных выходов
	0.07-0.2	1.0	1.2	1.5	
²⁰⁹ Pb	26			99	125
²⁰⁸ Pb	20	114		94	228
²⁰⁷ Pb	22			93	115
²⁰⁶ Pb	22			92	114
^{nat} Pb	-			93	93
⁶³ Cu	6		43	36	85
⁶⁵ Cu	11		40	35	86
⁵⁹ Co	75		39	-	114
Всего:					960

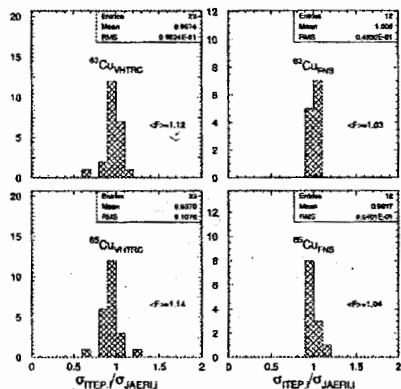
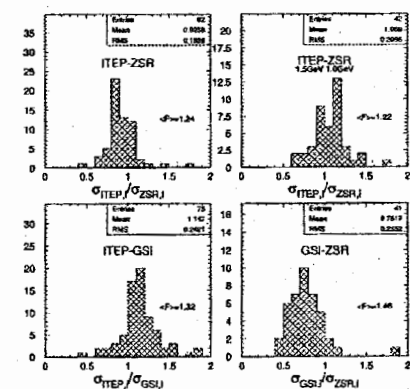


Рис 5. Результаты сравнения выходов продуктов реакций в ^{63,65}Cu при $E_p=1.2$ ГэВ, измеренных в ИТЭФ (детектор GC2518) и JAERI (детекторы VHTRC и FNS).

Дополнительные сравнения результатов, полученных в ИТЭФ - ZSR (прямая γ -спектроскопия) и в ИТЭФ - GSI (прямая и обратная кинематика) приведенные на рис.5, также подтверждают достоверность представленных результатов.

Несомненно, что существенную роль при решении сформулированной выше задачи, а именно - формирования систем ядерных констант для ЭЛЯУ, долж-

Рис 6. Результаты сравнения выходов продуктов реакций в ²⁰⁸Pb - ^{nat}Pb при $E_p=1.0$ ГэВ; (ИТЭФ-ZSR); ^{nat}Pb - ^{nat}Pb при $E_p=1.5$ ГэВ (ИТЭФ) и $E_p=1.6$ ГэВ (ZSR); ²⁰⁸Pb - ²⁰⁸Pb при $E_p=1.0$ ГэВ, (ИТЭФ-GSI); ²⁰⁸Pb - ^{nat}Pb при $E_p=1.0$ ГэВ, (GSI-ZSR).



ны играть также и расчетные методы. Поэтому в настоящей работе большое внимание уделялось верификации расчетных программ, наиболее часто используемых в мировой практике для этой цели.

В этом аспекте исследовались 13 программ:

- каскадно-экситонная CEM95 и её модификация CEM2k,
- каскадно-испарительно-делительно-транспортная CASCADE,
- каскадно-испарительно-делительно-транспортная CASCADE(INPE),
- каскадно-предравновесно-испарительно-делительная INUCL,
- каскадно-испарительная HETS,
- каскадно-испарительно-делительная LANET,
- предравновесно-испарительная GNASH,
- предравновесно-испарительная ALICE,
- квантово-молекулярно-динамическая QMD,
- каскадно-испарительно-делительная NUCLEUS,
- полуфеноменологическая YIELDX,
- полуфеноменологическая формула Foshina et al.

Следует иметь в виду, что в отличие от расчетных, экспериментальные данные, полученные методом прямой γ -спектроскопии, содержат не только независимые выходы остаточных ядер-продуктов, но и, главным образом, кумулятивные. Поэтому для корректного сравнения расчетных и экспериментальных данных необходимо на основе расчетных независимых выходов вычислить кумулятивный выход n -го нуклида можно вычислить по формуле

$$\sigma_n^{cum} = \sigma_n^{ind} + \sum_{l=1}^{n-1} \sigma_l^{ind} \prod_{j=1}^{n-l} \nu_j \quad (10)$$

Формула (10) была получена в предположении, что разветвленные (за счет изомерных переходов и α -распада) изобарные цепочки всегда можно представить в виде суперпозиции неразветвленных (линейных) цепочек.

Для корректного сравнения расчетных результатов, полученных по различным программам, они были перенормированы на единые сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами мишеней, вычисленные по известной формуле Летоу.

В качестве "критериев согласия" расчетных и экспериментальных данных принимались:

- отличие расчетного значения от экспериментального не более чем на 30% ($0.77 < \sigma_{calc} / \sigma_{exp} < 1.3$), в этом случае точность моделирования можно представить в виде числа таких событий по отношению к числу сравнений;

- средняя величина отношения совокупности расчетных результатов к экспериментальным

$$\langle F \rangle = 10^{\sqrt{(\lg(\sigma_{calc,i} / \sigma_{exp,i}))^2}} \quad (11)$$

со стандартным отклонением

$$S(\langle F \rangle) = \left(\left(\lg(\sigma_{calc,i} / \sigma_{exp,i}) - \lg(\langle F \rangle) \right)^2 \right)^{1/2}, \quad (12)$$

где $\langle \rangle$ - означает усреднение по всем $i=1 \dots N_s$, где N_s - число экспериментальных и расчетных результатов, используемых для сравнения.

Отметим, что средняя величина отношения $\langle F \rangle$ вместе со своим стандартным отклонением $S(\langle F \rangle)$ определяет интервал $\{\langle F \rangle / S(\langle F \rangle), \langle F \rangle \times S(\langle F \rangle)\}$, который покрывает около двух третей отношений расчетных результатов к экспериментальным.

Результаты, полученные с применением перечисленных программ, в графическом виде представлены в диссертации для каждого эксперимента, но в автореферате (рис.5 - 8) приводятся результаты сравнения только для ^{208}Pb при $E_p = 1.0$ ГэВ, так как на этих же графиках частично представлены результаты измерений выходов продуктов реакций, полученные при взаимодействии ионов ^{208}Pb с жидководородной мишенью при той же энергии в пересчете на нуклон, измеренные в GSI (Darmstadt) с использованием так называемой обратной кинематики.

• на рис. 5 представлены результаты детального сравнения экспериментальных и расчетных значений выходов радиоактивных ядер продуктов (критерий 1),

• на рис. 6 - согласованность экспериментальных и расчетных значений по выходам ядер - продуктов (критерий 2),

• на рис. 7 - экспериментальные и расчетные массовые распределения продуктов реакций,

• на рис. 8 - экспериментальные и расчетные значения независимых выходов некоторых продуктов реакций.

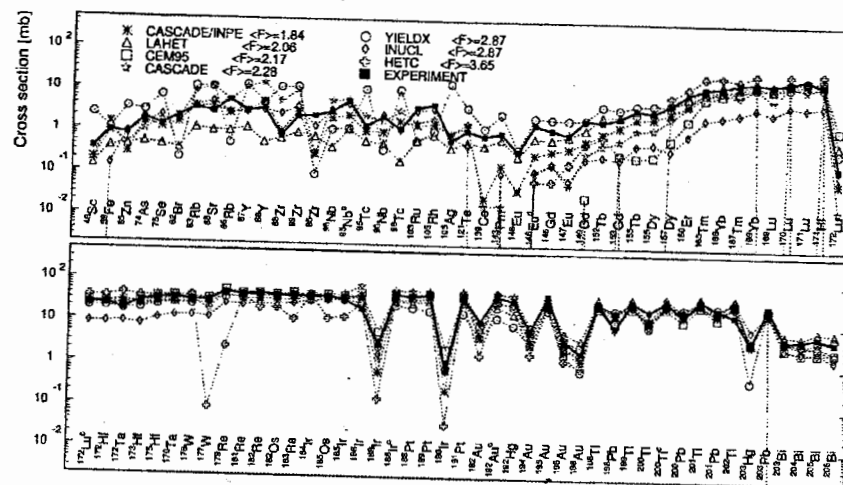


Рис. 5. Сравнение экспериментальных (закрашенные символы) и рассчитанных по программам CEM95 и LAHET (открытые символы) значений выходов радиоактивных ядер - продуктов для ^{208}Pb при $E_p = 1.0$ ГэВ.

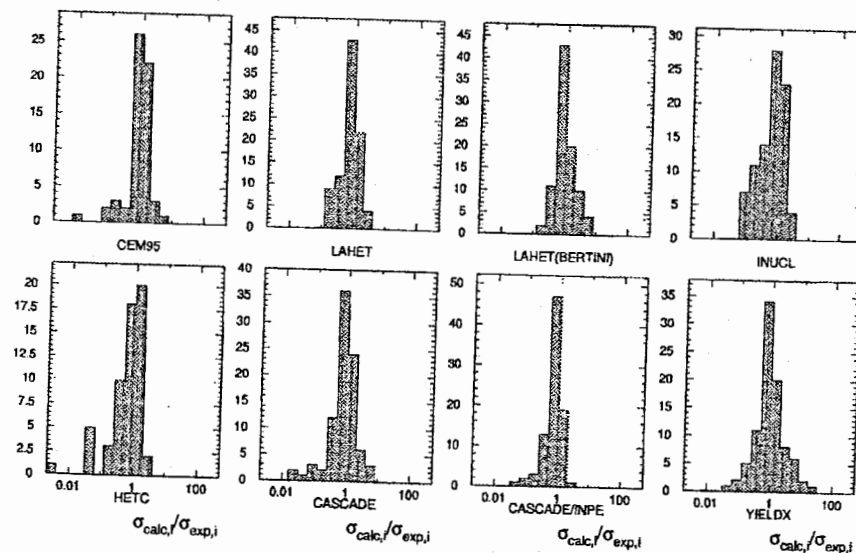


Рис. 6. Согласованность экспериментальных и расчетных результатов по выходам ядер продуктов ^{208}Pb при $E_p = 1.0$ ГэВ.

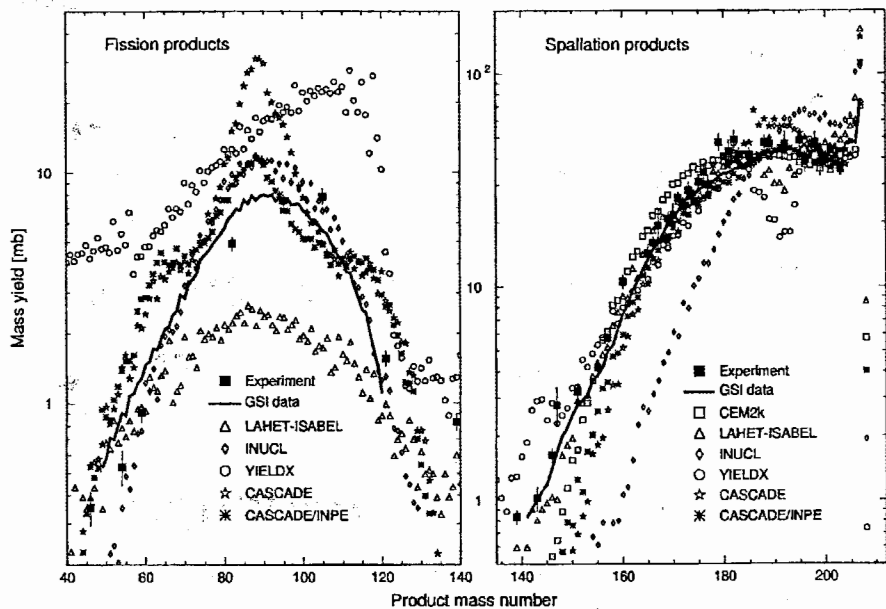


Рис. 7. Экспериментальные (ИТЭФ и GSI) и расчетные массовые распределения продуктов реакций ^{208}Pb при $E_p=1.0$ ГэВ (область массовых чисел выше 140 выделена отдельно для детальной демонстрации экспериментальных данных GSI).

Одновременно с расчетными результатами на рис. 7 представлены экспериментальные значения кумулятивных выходов продуктов, наиболее близких к стабильному изобару для данной массы (при наличии «левой» и «правой» ветвей цепочки – сумма таких выходов с обеих сторон). Очевидно, что расчетные результаты, приведенные на рисунках, не противоречат экспериментальным данным, если расчетные значения лежат выше экспериментальных и повторяют их общую тенденцию. Это объясняется тем, что используемый метод прямой γ -спектроскопии позволяет идентифицировать только радиоактивные продукты, которые, как правило, включают значительную долю полного массового выхода, но, при наличии стабильного изобара (или изобаров) данной массы, никогда не равны ему в точности.

Результаты полного анализа сравнения экспериментальных и расчетных данных были условно разделены на два диапазона массовых чисел и два диапа-

зона энергий: область тяжелых (Bi, Pb) и средних (Cu, Co) ядер, область высоких (1.0-1.5 ГэВ) и низких (0.07-0.2 ГэВ) энергий. Детальная информация по выделенным диапазонам приведена в табл. 4. Кроме того, в табл. 4 представлены сведения о предсказательной способности каждой из программ по каждому набору экспериментальных данных.

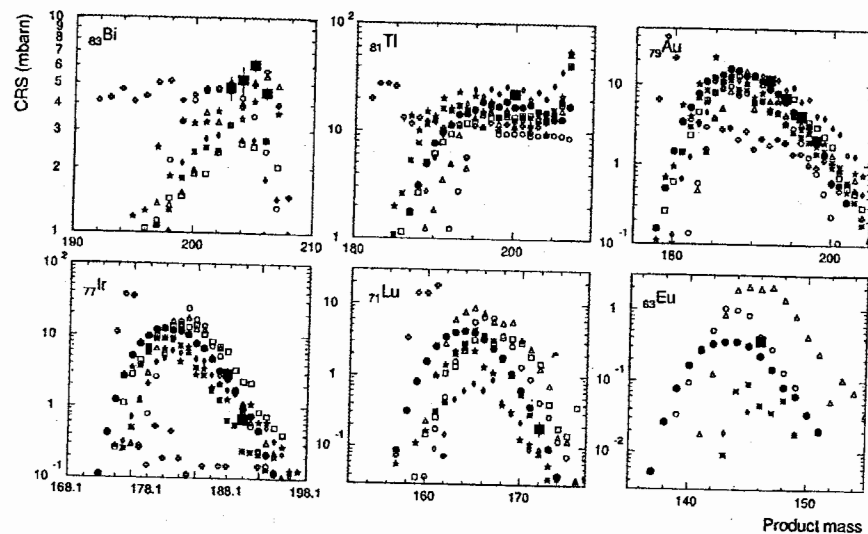


Рис. 8. Экспериментальные (прямая и обратная кинематика) и расчетные значения независимых выходов для ^{208}Pb при $E_p=1.0$ ГэВ.

В табл. 4 приняты следующие обозначения: N_T – полное число измеренных выходов; N_G – число измеренных выходов, выбранных для сравнения с расчетными данными; N_S – число расчетных выходов из списка N_G , представляемых программой; (F) со своим стандартным отклонением $S(F)$ – среднеквадратичное отклонение расчетных результатов от экспериментальных; $N_{c1.3}$ – число сравнений, при которых расчетные значения отличаются от экспериментальных не более чем на 30%; $N_{c2.0}$ – число сравнений, при которых расчетные значения отличаются от экспериментальных не более чем в 2 раза.

Ввиду того, что только $\sim 2/3$ продуктов являются продуктами спаллейшн-реакций, важным критерием работоспособности программ является их способность моделировать процессы высокоэнергетического деления и фрагментации.

Среди используемых программ только программа YIELDX моделирует выходы ядер всех трех наблюдаемых в эксперименте каналов реакций (глубокое расщепление, деление, фрагментация). Программы LAHET, CASCADE, INUCL и NUCLEUS моделируют глубокое расщепление и деление, а программы HETC и CEM95 – только глубокое расщепление, что проявляется как за счет низкой величины количества промоделированных продуктов (параметр N_S в табл. 5), так и из хода расчетных кривых на рис. 5,7.

Таблица 4

Общая статистика сравнений экспериментальных и расчетных результатов по выходам ядер-продуктов

Программа	$^{63,65}\text{Cu}$, $E_p=0.13\text{ГэВ}$ ^{59}Co , $E_p=0.07, 0.10, 0.13, 0.20\text{ГэВ}$ $N_T=92, N_G=71$			^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$, $E_p=1.2, 1.5\text{ГэВ}$ $N_T=193, N_G=161$		
	$N_{c1.3}/N_{c2.0}/N_S$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$	$N_{c1.3}/N_{c2.0}/N_S$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$
CEM95	27/46/64	2.24	1.88	46/96/149	2.22	1.69
LAHET	27/45/69	2.33	1.86	45/112/151	1.90	1.47
INUCL	15/39/71	2.51	1.74	38/89/153	2.20	1.65
HETC	8/21/49	5.47	3.47	19/43/96	4.47	2.93
CASCADE	5/10/33**	3.97	2.23	20/58/152	3.40	2.09
ALICE (Fermi)	7/15/34**	3.17	2.02	-	-	-
ALICE (Kataria)	12/21/34**	2.15	1.64	-	-	-
YIELDX	24/45/71	2.28	1.78	64/142/160	1.59	1.33
NUCLEUS	8/14/30**	2.85	2.02	16/54/89*	2.18	1.51
FOSHINA et al.	14/36/71	2.72	1.90	43/108/156	2.25	1.81
QMD	11/24/32**	1.98	1.60	17/50/78*	2.45	1.81
Программа	$^{206,207,208}\text{Pb}$, ^{209}Bi , $E_p=0.13\text{ГэВ}$ $N_T=90, N_G=76$			$^{206,207,208}\text{natPb}$, ^{209}Bi , $E_p=1.5\text{ГэВ}$ $N_T=584, N_G=508$		
	$N_{c1.3}/N_{c2.0}/N_S$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$	$N_{c1.3}/N_{c2.0}/N_S$	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$
CEM95	37/59/76	2.16	1.94	184/305/386	1.96	1.71
LAHET	42/70/76	1.47	1.28	138/375/507	2.03	1.62
INUCL	23/48/71	2.14	1.68	152/298/501	2.99	2.24
HETC	23/55/76	2.21	1.78	112/253/366	3.34	2.85
CASCADE	34/68/76	1.61	1.40	156/306/416	2.22	1.86
ALICE (Fermi)	39/69/76	1.62	1.44	-	-	-
YIELDX	39/68/76	1.49	1.29	107/253/503	3.16	2.22
QMD	13/40/76	2.32	1.58	88/284/415	2.33	1.80
GNASH	2/6/9***	2.35	1.78	-	-	-

* $N_T=110, N_G=93$, ** $N_T=41, N_G=34$, *** было промоделировано только 9 ядер-продуктов.

На рис. 9,10 предсказательная способность каждой программы представлена в графическом виде.

Выполненные эксперименты по определению выходов продуктов реакций в тонких экспериментальных образцах позволили достаточно точно вычислить их активность и мощность экспозиционной дозы γ -излучения на момент измерения, так как большая часть γ -излучателей была идентифицирована. Для вычисления активности отдельных нуклидов были использованы следующие формулы:

$$\alpha(t_j, kT + \tau) = \frac{A_0}{\epsilon\eta} \cdot e^{-\lambda(t_j - kT - \tau)}, \quad (13)$$

$$\alpha(t_j, kT + \tau) = \frac{[A_1 e^{-\lambda_1(t_j - kT - \tau)} + A_2 e^{-\lambda_2(t_j - kT - \tau)}]}{\epsilon\eta}, \quad (14)$$

где α – активность, t – время прошедшее от момента облучения до измерения;

j – число измерений.

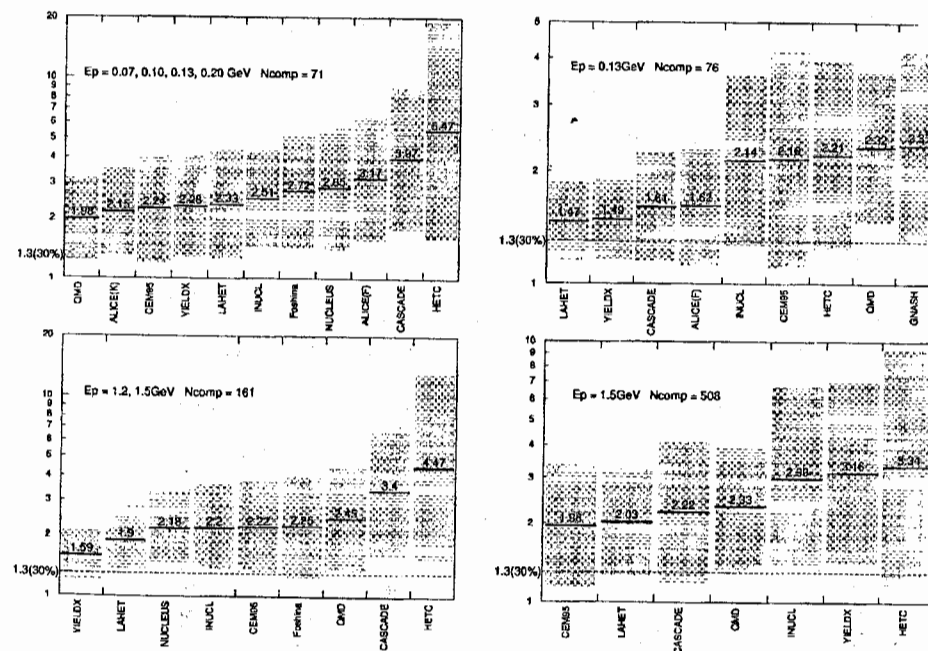


Рис. 9. Оценки предсказательной способности программ для средних ядер в различных диапазонах энергий.

Рис.10. Оценки предсказательной способности программ для тяжелых ядер в различных диапазонах энергий.

Формула (13) использовалась, если предшественники отсутствовали, или же их времена жизни были либо намного меньше времени начала первого изме-

рения, либо намного больше времени начала последнего. Формула (14) использовалась, если времена жизни предшественников были сравнимы со временем, прошедшим после облучения. Полная активность экспериментальных образцов определялась как сумма активностей отдельных нуклидов.

Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 см от экспериментального образца определялась суммированием мощностей экспозиционных доз от отдельных нуклидов, которые вычислялись умножением полученных активностей отдельных нуклидов на соответствующие значения γ -постоянной K_γ .

Моделирование накопления радионуклидов в мишени при облучении и последующем их распаде осуществлялось при помощи программ LCS(LAHET)+HMCNP) и CINDER'90. В качестве исходных данных использовались: состав экспериментального образца, его масса, энергия пучка, время облучения и флюенс.

Для оценки предсказательной способности программ использовались "критерии согласия", описанные выше. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений активности и мощности дозы тонких экспериментальных образцов представлены в табл. 5, некоторые из полученных результатов представлены на рис. 11.

Таблица 5

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных результатов активности и мощности экспозиционной дозы тонких экспериментальных образцов

Образец	Энергия протонов, (ГэВ)	<F>Активность	<F>Доза
^{nat} Pb	1.5	2.01	1.27
²⁰⁹ Pb	1.5	1.64	1.38
⁵⁹ Co	1.2	1.29	1.35
⁵⁹ Co	0.13	3.96	1.82
⁶³ Cu	1.2	2.30	1.98
⁶⁵ Cu	1.2	1.26	1.25
⁶³ Cu	0.13	1.20	1.32
⁶⁵ Cu	0.13	1.47	1.75

В отличие от исследований с "тонкими" мишенями, проводимых для определения микроскопических ядерных данных, исследования с "толстыми" мишенями имеют целью измерение интегральных характеристик, отражающих реальную ситуацию с мишенными узлами идентичного состава. Так как для практического ис-

пользования при расчете бланкетов ЭЛЯУ от мишенного комплекса требуются его нейтронно-физические и спектральные характеристики, то предпочтение было отдано измерению значений скоростей пороговых реакций на внешней поверхности «толстых» мишеней. Такой подход позволяет, рассчитав спектры вторичных частиц и соответствующие функции возбуждения (дифференциальные сечения) пороговых реакций вплоть до верхней границы, определяемой энергией налетающего протона, сравнить их экспериментальные и расчетные значения.

Для вычисления скоростей ядерных реакций использовалась формула

$$R^{A^B}_{(n,\chi n\gamma p)} = \frac{N^{cD}}{N^{AB}} \cdot \frac{1}{S_D \cdot N_P} = \left(\frac{S_0 \cdot k_\mu}{\lambda \cdot \eta \cdot \varepsilon} \right)^{cD} \cdot \frac{1}{N^{AB}} \cdot \frac{1}{S_D \cdot N_P}, \quad (15)$$

где $R^{A^B}_{(n,\chi n\gamma p)}$ - абсолютная величина скорости ядерной реакции; B, D - химические символы элементов; A, C - массовые числа; N^{AB} - число ядер в экспериментальном образце; N^{cD} - число ядер, образовавшихся в экспериментальном образце под действием соответствующей ядерной реакции; S_D - площадь поперечного сечения экспериментального образца; N_P - общее число протонов, облучивших мишень (флюенс); S_0 - скорость счета в пиках полного поглощения, приведенная к концу облучения; k_μ - поправка, учитывающая ослабление измеряемой γ -линии в материале экспериментального образца.

Исследуемая вольфрамовая мишень представляла собой цилиндр диаметром 200 мм и длиной 360 мм. Экспериментальные образцы размещались на ее внешней поверхности, схема их расположения представлена на рис. 12.

Облучение вольфрамовой мишени осуществлялось в ИФВЭ на бустере ускорителя У-70 пучком протонов с энергией 1090 МэВ и длительностью 290 с. Общее число суперциклов составило 39, флюенс протонов - $(4.75 \pm 0.24) \cdot 10^{14}$. Для исключения вклада фоновой реакции, обусловленной радиационным захватом тепловых нейтронов, все экспериментальные образцы помещались в кадмиевые чехлы толщиной 0.5 мм. Техника эксперимента также основывалась на использовании метода прямой γ -спектрометрии. Результаты измерения значений скоростей пороговых реакций на внешней поверхности «толстой» вольфрамовой мишени представлены на рис. 13.

Неопределенность значений скоростей ядерных реакций рассчитывалась с использованием формулы переноса ошибок. Анализ показывает, что их значения в основном находятся в интервале от 6 до 12%.

Моделирование экспериментальных результатов для «толстой» мишени состояло из двух этапов. На первом - рассчитывался спектр нейтронов в точках расположения экспериментальных образцов, на втором - сечения соответствующих реакций в диапазоне 20-1090 МэВ.

Расчет спектра нейтронов осуществлялся с использованием 4-х программ, упомянутых выше: SEM-95, INUCL, CASCADE, LANET. Для моделирования транспорта продуктов высокоэнергетического ядерного каскада из внутренней области W- мишени на её поверхность программы SEM-95 и INUCL совмещались с геометрической оболочкой программы HETC, а программы CASCADE, LANET осуществляли его независимо. Транспорт низкоэнергетических нейтронов ($E_n < 20$ МэВ), образовавшихся непосредственно в адронном каскаде и в результате замедления высокоэнергетических нейтронов ($20 < E_n < 1090$ МэВ) в объеме мишени, осуществлялся с помощью программы MCNP с библиотекой ENDF/B-V.

Расчет сечений измеряемых пороговых реакций в диапазоне ($20 < E_n < 1090$ МэВ) осуществлялся по этим же программам. Сечения реакций при энергиях нейтронов ниже 20 МэВ были взяты из библиотек ENDF/B-VI и JENDL3.

Расчетные значения скоростей реакций вычислялись в виде интегрального произведения спектра нейтронов на соответствующие сечения реакций. «Критерии согласия», разработанные для оценки предсказательной способности программ в экспериментах с «тонкими» мишенями и описанные выше, были использованы также и для оценки предсказательной способности программ в эксперименте с «толстой» мишенью.

Графическое распределение расчетных скоростей реакций также приведено на рис.13. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений скоростей реакций в диапазоне энергий $0.5 \text{ эВ} < E_n < 1 \text{ ГэВ}$, выполненные с использованием «критериев согласия», представлены в табл. 6.

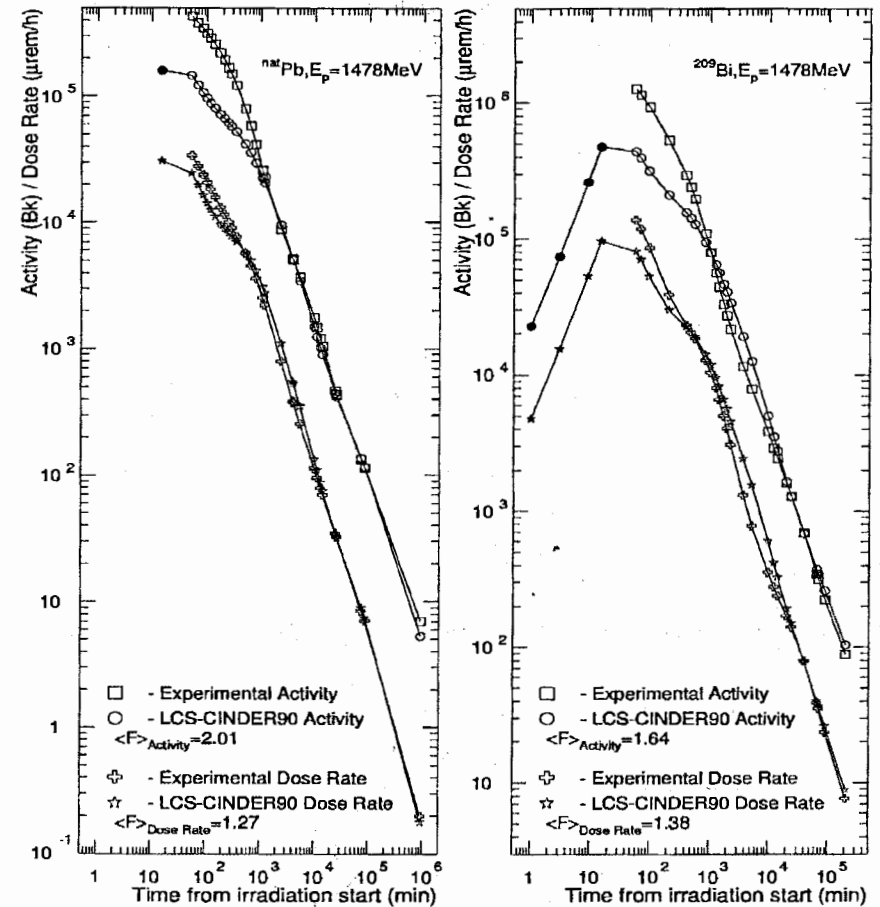


Рис. 11. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов по определению активности и мощности дозы тонких экспериментальных образцов.

Наряду с исследованиями мишенного узла ЭЛЯУ, в диссертации изучались также ядерно - физические характеристики возможных конструкций их бланкета. Эти исследования были начаты с изучения критических состояний решеток, содержащих тяжеловодную микромодель бланкета, эффектов реактивности и абсолютных значений скоростей реакций в ней. Такой выбор был обусловлен тем, что в одной из первых концепций ЭЛЯУ подкритический бланкет предполагался тяжеловодным. Тяжеловодный раствор трансмутируемых актинидов должен был

циркулировать в нем в специальных петлях. Именно по этой причине были проведены измерения эффективного резонансного интеграла ^{237}Np по радиационному захвату.

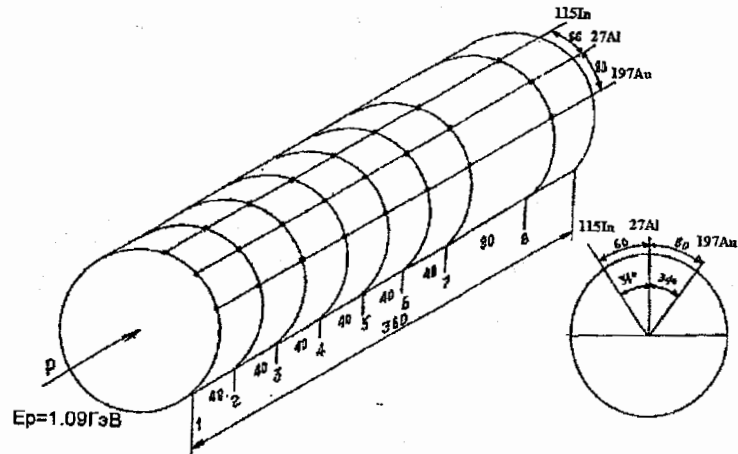


Рис. 12. Схема расположения экспериментальных образцов на вольфрамовой мишени.

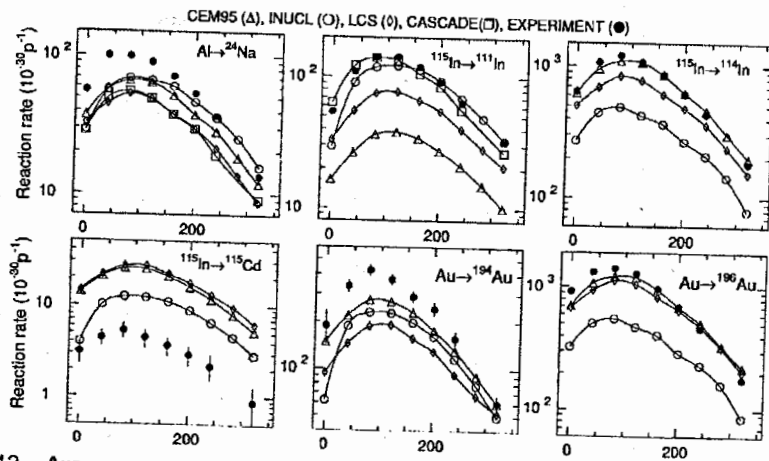


Рис. 13. Аксиальные распределения экспериментальных и расчетных значений пороговых скоростей реакций на внешней поверхности вольфрамовой мишени при облучении ее протонами с энергией 1 ГэВ.

Таблица 6

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов по скоростям пороговых реакций в диапазоне энергий 0.5 эВ – 1 ГэВ

Программа	Диапазон Энергии	Число Сравнений	(F)	S((F))
CEM95	0.5 эВ – 1 ГэВ.	48	2.39	1.95
LAHET	0.5 эВ – 1 ГэВ.	48	2.32	1.73
INUCL	0.5 эВ – 1 ГэВ.	48	2.03	1.46
CASCADE	0.5 эВ – 1 ГэВ.	16	1.56	1.31

Его математическое выражение может быть представлено в следующем

виде:

$$I_{\text{эфф}}^{237\text{Np}} = \frac{\int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma_{n,\gamma}^{237\text{Np}}(E) \cdot \varphi(E) \cdot dE}{\Phi_{\text{res}}} \cdot \xi \quad (16)$$

где $R_{n,\gamma}^{237\text{Np}} = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma_{n,\gamma}^{237\text{Np}}(E) \cdot \varphi(E) \cdot dE$ - скорость реакции радиационного захвата

^{237}Np ; Φ_{res} - плотность потока резонансных нейтронов; ξ - поправка, учитывающая отклонение спектра нейтронов от спектра Ферми.

Величина скорости реакции радиационного захвата ^{237}Np может быть определена как

$$R_{n,\gamma}^{237\text{Np}} = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma_{n,\gamma}^{237\text{Np}}(E) \cdot \varphi(E) \cdot dE = \frac{N^{238\text{Np}}}{N^{237\text{Np}} \cdot F^{237\text{Np}}(t)} \quad (17)$$

где $N^{238\text{Np}}$ - число образовавшихся ядер ^{238}Np ; $N^{237\text{Np}}$ - число ядер облучаемого ^{237}Np ; $F^{237\text{Np}}(t)$ - временная функция, учитывающая распад ^{238}Np в процессе облучения.

Исследования, связанные с изучением резонансного поглощения в тяжеловодном растворе ^{237}Np , выполнялись на установке "МАКЕТ", представляющей собой реактор "нулевой" мощности.

Для облучения была сформирована нестандартная решетка, состоящая из 36 ТВС и одного специального канала, в котором облучался экспериментальный блок с ампулой (внешний и внутренний диаметры - 14,1 и 12,1 мм, соответственно, высота - 83 мм) с раствором $^{237}\text{Np} + \text{D}_2\text{O}$. Элементы решетки были расставлены с шагом 200 мм и размещены в баке диаметром 2600 мм с тяжеловодным замедлителем. ТВС представляла собой сборку стандартных твэлов втулочного

типа с высокообогащенным (90 %) ^{235}U . Для уменьшения радиационного фона, обусловленного ^{233}Pa , на предварительной стадии приготовления тяжеловодного раствора была осуществлена радиохимическая очистка ^{237}Np с последующей аттестацией. Объем раствора в ампуле составлял 4 мл.

Ампула была загерметизирована, экранирована кадмиевым чехлом и помещена в экспериментальный блок для облучения. Время облучения составило 2 часа. После облучения ампула извлекалась из экспериментального блока, и из облученного раствора с помощью мерной пипетки в тонкостенные бюксы из нержавеющей стали отбирались две аликвотные пробы объемом 0,5 мл. Раствор выпаривался, и полученный осадок прокаливался, что обеспечивало разложение нитратной соли и сцепление нептуния с материалом бюкса. Для предотвращения потерь каждый бюкс закрывался крышечкой и поочередно обсчитывался на спектрометре с детектором GC2518 в течение 10 дней.

Аттестация потока нейтронов осуществлялась двумя способами - с кадмиевым фильтром и без него. В обоих случаях в измерениях использовались многокомпозиционные экспериментальные образцы (сплав $\text{Al} + ^{55}\text{Mn} + ^{\text{Есм}}\text{Cu} + ^{197}\text{Au} + ^{\text{Есм}}\text{Lu}$), представляющие собой фольги $\varnothing 6,3$ мм и толщиной 100 мкм.

Поправки на отклонение спектра нейтронов, падающих на исследуемую ампулу, от спектра Ферми, были выполнены по программе MCNP 4A со статистикой $1,4 \cdot 10^6$ историй. Были выполнены расчеты спектров нейтронов в диапазоне от 0,5 эВ до 0,1 МэВ в ампуле с раствором ^{237}Np и с чистой тяжелой водой. Как показали расчеты, доля надтепловых нейтронов в реальном спектре существенно выше, чем в спектре Ферми, что объясняется большой удаленностью экспериментального устройства от топливных каналов (~200 мм), и, соответственно, большими значениями параметра ξ .

При расчете скоростей реакций использовались константы с непрерывными по энергии зависимостями, подготовленные на основе библиотеки ядерных данных ENDF/B - VI. Значения скоростей реакций в спектре Ферми были рассчитаны по программе NJOY. В качестве диапазона интегрирования при их расчете был выбран диапазон от 0,5 эВ до 2 МэВ.

Окончательное значение эффективного резонансного интеграла ^{237}Np определялось по формуле

$$I_{\text{эфф}}^{237\text{Np}} = \frac{\sum_{A_B} I_{\text{эфф}}^{237\text{Np}(A_B)}}{n}, \quad (18),$$

где $\sum_{A_B} I_{\text{эфф}}^{237\text{Np}(A_B)}$ - эффективный резонансный интеграл ^{237}Np , при вычислении

которого использовался нуклид A_B (^{55}Mn , ^{63}Cu , ^{197}Au) для определения Φ_{res} ; n - число нуклидов A_B , используемых для определения Φ_{res} . Измеренное значение $I_{\text{эфф}}^{237\text{Np}}$ составило 539 ± 40 барн, что отличается от его значения при бесконечном разбавлении (640 ± 50 барн) на ~16%.

Физические исследования тяжеловодных бланкетов ЭЛЮ были продолжены изучением особенностей уран - ториевого топливного цикла при его возможном использовании в бланкетах такого типа. Интерес к таким исследованиям обусловлен его большей «экологичностью» по сравнению с традиционным уран - плутониевым.

Как известно, одна из основных проблем при использовании этого топливного цикла связана с накоплением ^{232}U . Поскольку основные каналы его образования обусловлены пороговыми $(n, 2n)$ - реакциями, то для верификации программ, используемых для расчета изменения нуклидного состава облучаемого тория в системах такого типа, наряду с пространственными распределениями нейтронных полей в области тепловой и промежуточной энергий, требуются данные в области энергии нейтронов $\geq 6,5$ МэВ.

С целью получения экспериментальных данных, используемых для верификации расчетных программ, были выполнены две группы экспериментов:

интегральные, в задачу которых входило определение критических композиций и эффектов реактивности;

активационные, для изучения пространственно-энергетического распределения нейтронов (измерение абсолютных значений скоростей реакций).

Экспериментальные исследования также выполнялись на установке «МАКЕТ», в решетку которой было введено экспериментальное устройство для измерения абсолютных значений скоростей реакций с целью изучения накопления ^{232}U и измерения пустотного коэффициента реактивности в тяжеловодных

растворах ^{232}Th . Устройство состояло из защитного сухого канала, внутри которого размещалась коаксиальная емкость $\varnothing 177 \times 72.6$ мм и высотой 600 мм для заполнения ее тяжелой водой или тяжеловодным раствором азотнокислого тория. Емкость располагалась по центру активной зоны.

Формула для вычисления абсолютных скоростей реакций $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$, $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)$, $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$, $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)$, $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$, $^{232}\text{Th}(n, \gamma)$ имеет вид:

$$R_{(n, \gamma)}^{A+B} = \frac{N^{A+B}}{N^{AB}} \cdot \frac{1}{F^{A+B}} = \left(\frac{S_0}{\lambda \cdot \eta \cdot \varepsilon} \right)^{A+B} \cdot \frac{1}{N^{AB}} \cdot \frac{1}{F^{A+B}}, \quad (19)$$

где N^{A+B} - число вторичных ядер, образовавшихся в экспериментальном образце; N^{AB} - число ядер исходного материала в нем.

Аксиальные распределения измеренных скоростей реакций представлены на рис. 14.

С использованием метода прямой γ -спектрометрии определялась мощность критического стенда МАКЕТ, при которой проводились облучения экспериментальных образцов. Методика была основана на измерении абсолютных значений скорости реакций деления ^{235}U в ТВС решетки.

Вследствие симметрии изучаемой решетки эксперименты по определению энерговыделения выполнялись с 1/6 ее частью, в состав которой входило 7 ТВС.

С учетом требований, предъявляемых к экспериментальным образцам, используемым для измерения распределения относительных скоростей реакций по длине ТВС, были выбраны образцы ^{63}Cu в виде фольг из меди естественного содержания $\varnothing 6,3$ мм и толщиной 100 мкм. Для измерения абсолютных скоростей реакции $^{235}\text{U}(n, f)$ использовались экспериментальные образцы из высокообогащенного урана (обогащение по ^{235}U - 90%) в виде фольг $\varnothing 6,3$ мм и толщиной 100 мкм. Скорость $^{235}\text{U}(n, f)$ - реакции регистрировалась по интенсивности γ -излучения ^{143}Ce .

Энерговыделение в исследуемой активной зоне получено равным 88.1 ± 2.6 Вт.

Интегральные эксперименты по определению критических композиций и эффектов реактивности были также разделены на две группы: при переменной концентрации тория в растворе и полном заполнении экспериментальной емко-

сти; при порционном заполнении экспериментальной ёмкости тяжеловодным раствором с максимальной концентрацией азотнокислого тория.

Результаты измерений для этих групп экспериментов представлены на рис. 15 и 16, соответственно.

Одновременно с экспериментальными исследованиями проводилось их расчетное моделирование с использованием программы MCU 3.0 и комплекса гетерогенных программ TRIFON - TRECD.

При расчете по программе MCU рассматривалась 1/4 часть активной зоны. Из выполненных расчетов было получено 29-групповое энергетическое распределение плотности потока нейтронов в местах расположения экспериментальных образцов. Для выбранных индикаторов на основе библиотеки оцененных данных ENDF/B-VI были подготовлены групповые сечения и рассчитаны скорости соответствующих реакций с нормировкой на 1 Вт тепловой мощности активной зоны и 1 грамм вещества.

Расчет нейтронно-физических параметров по комплексу программ TRIFON - TRECD основан на гетерогенном методе, состоящем из двух этапов. На первом этапе проводится детальный многогрупповой расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов в многозонной цилиндрической ячейке, основанный на использовании универсальных микроконстант (24 группы в эпитепловой области с энергией нейтронов больше 0,465 эВ и 10 групп в тепловой "термализационной" области) и вычислении матрицы эффективных граничных условий, задающей соотношение между малогрупповыми вектором-поток и вектором-током нейтронов на поверхности ячейки. Этот расчет выполнялся по программе TRIFON.

На втором этапе проводится трехмерный малогрупповой расчет распределения потоков нейтронов и интенсивностей различных процессов в ячейках активной зоны blankets. Эти расчеты выполняются по программе TRECD, основанной на разностном представлении гетерогенных уравнений реактора.

Предсказательная способность программ TRIFON - TRECD и MCU по оценке критических состояний решеток и эффектов представлена в табл. 7.

"Критерии согласия", разработанные для оценки предсказательной способности программ в экспериментах с "тонкими" мишенями и описанные выше, были

использованы также и для оценки предсказательной способности программ в экспериментах с тяжеловодной микромоделью.

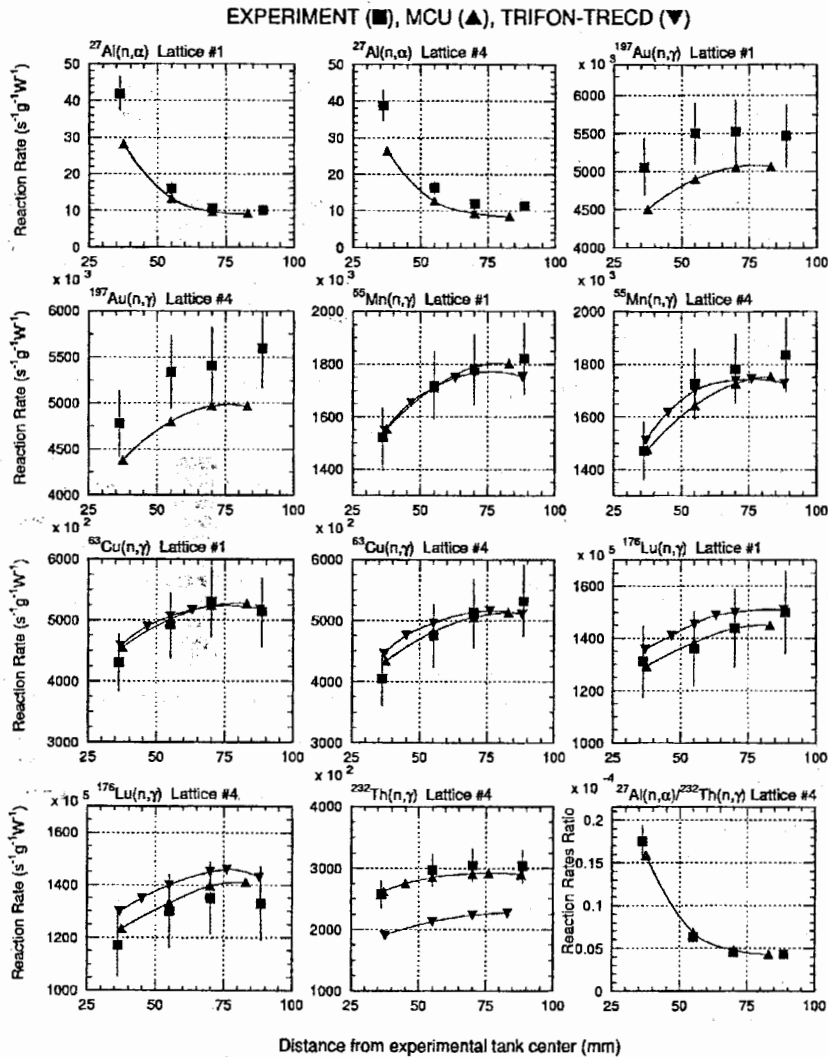


Рис. 14. Аксиальные распределения экспериментальных и расчетных значений скоростей реакций в микромоделли blankets, заполненной тяжеловодным раствором азотнокислого тория.

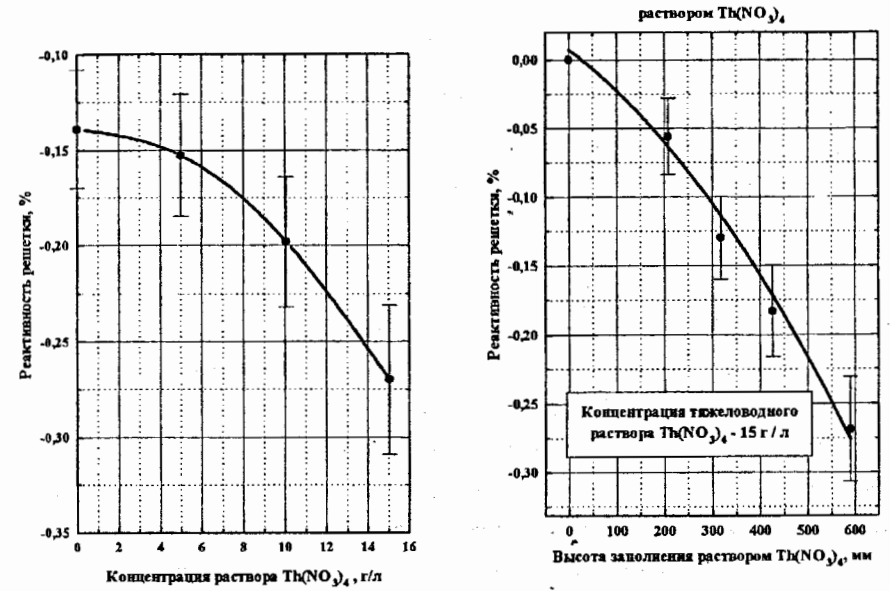


Рис. 15. Зависимость реактивности решетки от концентрации тяжеловодного раствора $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ в микромоделли.

Рис. 16. Зависимость реактивности решетки от высоты заполнения микромоделли раствором $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$.

Таблица 7

Отличие расчетных значений критических состояний тяжеловодных решеток и эффектов реактивности микромоделли тяжеловодного blankets от экспериментальных значений

Программы	
TRIFON-TREC	MCU
По $K_{\text{эфф}}$	
0.73%	-
0.67%	-
0.64%	-
0.62%	-0.31%
0.32%	-0.25%
По эффекту реактивности	
-	0.9%
-	1.0%

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений скоростей реакций в диапазоне энергий $0.025 \text{ эВ} < E_n < 20 \text{ МэВ}$, выполненного с использованием «критериев согласия», представлены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных результатов значений скоростей реакций в диапазоне энергий $0.025 \text{ эВ} < E_n < 20 \text{ МэВ}$

Программа	Диапазон энергии	Число сравнений	$\langle F \rangle$	$S(\langle F \rangle)$
MCU	0.025эВ – 20 МэВ	44	1.18	1.15
TRIFON – TRECD	0.025эВ – 20 МэВ	40	1.09	1.06

Хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений скоростей реакций $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$, $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)$, $^{63}\text{Cu}(n, \gamma)$, $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)$, $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$, $^{232}\text{Th}(n, \gamma)$, имеющих различную чувствительность к тепловой, резонансной и быстрой областям нейтронного спектра, обусловило возможность проведения расчетных исследований изменения содержания нуклидов при облучении ^{232}Th в спектре, соответствующем спектру тяжеловодной микромоделли бланкета ЭЛЯУ с азотнокислым торием.

Таблица 9

Содержание актинидов (в граммах) в 1 кг ^{232}Th при его облучении в потоке нейтронов $10^{14} \text{ н/см}^2 \times \text{с}$ и выдержке после облучения 1(30) суток.

Актинид	Время облучения, лет		
	0	1	5
^{232}Th	1000	982.2	914.1
^{232}U	0	$2.732(2.747) \times 10^{-4}$	$36.60(36.62) \times 10^{-4}$
^{233}U	0	10.09(11.05)	15.07(15.96)

Таблица 10

Содержание актинидов (в граммах) в 1 кг ^{232}Th при его облучении в потоке нейтронов $10^{14} \text{ н/см}^2 \times \text{с}$ и выдержке после облучения 1 (30) суток с отводом продуктов деления и добавлением ^{232}Th

Актинид	Время облучения, лет		
	0	1	5
^{232}Th	1000	987.5	977.2
^{232}U	0	$2.734(2.749) \times 10^{-4}$	$37.32(37.34) \times 10^{-4}$
^{233}U	0	10.10(11.07)	15.83(16.79)

Было рассмотрено два режима облучения: непрерывное облучение 1 кг тория в течение 1 или 5 лет с плотностью потока нейтронов $10^{14} \text{ н/см}^2 \times \text{с}$; непрерывное облучение 1 кг тория в течение 1 или 5 лет с плотностью потока нейтронов $10^{14} \text{ н/см}^2 \times \text{с}$ и с постоянным отводом образовавшихся продуктов деления и добавлением ^{232}Th .

Во всех случаях расчеты приводились для двух времен выдержки после облучения - 1 сутки и 30 суток. Расчет спектра нейтронов выполнен по программе MCU, изменение изотопного состава рассчитано по программе BLC. Результаты расчета приведены в табл. 9 и 10.

Анализ результатов по предсказательной способности «высокоэнергетических» (табл. 4,5,6) и «реакторных» программ (табл. 7,8) свидетельствует, что уровень точности, достигаемый «высокоэнергетическими» программами (в отличие от «реакторных»), в настоящее время не в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к практическим расчетам характеристик ЭЛЯУ. Вместе с тем историческая практика развития константного и программного обеспечения прикладных задач ядерной физики дает основание надеяться, что в ходе дальнейших работ по усовершенствованию «высокоэнергетических» программ и их адаптации к «реакторным» задачам уровень точности их предсказаний может быть существенно повышен.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнены исследования по определению выходов продуктов протонных реакций в ^{209}Bi , ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb при $E_p = 0.13$ и 1.5 ГэВ ; ^{nat}Pb при $E_p = 1.5 \text{ ГэВ}$; ^{208}Pb при $E_p = 1.0 \text{ ГэВ}$; $^{65,63}\text{Cu}$ при $E_p = 1.5, 1.2$ и 0.13 ГэВ ; ^{59}Co при $E_p = 1.2, 0.20, 0.13, 0.10$ и 0.07 ГэВ . Всего получено 960 значений, из которых: 110 независимых выходов, 84 независимых выхода метастабильных состояний, 98 независимых выходов сумм метастабильных и основных состояний, 668 кумулятивных выходов. Большая часть результатов получена впервые.

2. Уточнена нейтронная составляющая в выводимых протонных пучках, используемых для оценки вклада пороговых нейтронных реакций в полученные значения выходов.

3. Проведены измерения сечения реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$, используемой в качестве основной мониторинг.

4. Исследована зависимость эффективности регистрации спектрометра от расстояния источник – детектор.

5. Осуществлено межлабораторное сравнение результатов независимых измерений выходов продуктов ядерных реакций в экспериментальных образцах $^{63,65}\text{Cu}$, одновременно облученных на ускорителе ИТЭФ и измеренных в ИТЭФ и в JAERI.

6. Выполнены экспериментальные и расчетные исследования интегральных радиационных характеристик (активность, мощность экспозиционной дозы γ -излучения) облученных материалов, перспективных для использования в конструкциях ЭлЯУ.

7. На основе полученных экспериментальных результатов выполнена верификация 14-ти расчетных программ, используемых в мировой практике для моделирования параметров ЭлЯУ (CEM95, CEM2k, CASCADE, CASCADE (INPE), INUCL, HETC, LAHET, GNASH, ALICE, QMD, NUCLEUS, YIELDX, Foshina et al., CINDER'90).

8. Проведены экспериментальные исследования и расчетное моделирование скоростей пороговых реакций на внешней поверхности вольфрамовой мишени при облучении ее протонами с энергией 1090 МэВ. Результаты измерений сравнены с полученными расчетным путем с использованием программ LAHET, CASCADE, CEM95 и INUCL.

9. Получено экспериментальное значение эффективного резонансного интеграла ^{237}Np по радиационному захвату в растворе тяжелой воды. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о существовании блокировки резонансных уровней, значение которой достигает ~16%.

10. С использованием тяжеловодной микромодели бланкета ЭлЯУ проанализированы характеристики критических композиций решеток и эффектов реактивности.

11. Измерены скорости реакций $R_{n,\gamma}^{61\text{Cu}}$, $R_{n,\gamma}^{55\text{Mn}}$, $R_{n,\gamma}^{197\text{Au}}$, $R_{n,\gamma}^{176\text{Lu}}$, $R_{n,\alpha}^{27\text{Al}}$, $R_{n,\gamma}^{232\text{Th}}$ в различных точках микромодели бланкета ЭлЯУ, заполненного тяжеловодным

раствором азотнокислого тория. Полученные значения сравнены с результатами моделирования по «реакторным» программам MCU, TRIFON – TRECD.

12. Проведены расчеты накопления ^{232}U и ^{233}U при облучении тяжеловодного раствора ^{232}Th в бланкете ЭлЯУ.

13. Проведено сравнение предсказательных способностей 12-ти указанных выше «высокоэнергетических» программ и 2-х «реакторных» программ в областях энергий нейтронов $0.5 \text{ эВ} < E_n < 1 \text{ ГэВ}$ и $0.025 \text{ эВ} < E_n < 20 \text{ МэВ}$.

Работы по теме диссертации

1. О.В. Шведов, Ю.Е.Титаренко, Е.И.Карпихин, В.Д. Казарицкий, В.Ф.Батяев, Ю.В. Кочевалин, Н.В. Степанов. "Экспериментальные и расчетные исследования сечений реакций глубокого расщепления ^{59}Co протонами с энергией 1.2 ГэВ." Части 1 и 2, Препринты ИТЭФ № 81, М., 1993, 1-15 и № 30, М., 1994, 1-25.
2. О.В. Шведов, Ю.Е.Титаренко, Е.И.Карпихин, В.Д. Казарицкий, В.Ф.Батяев, Ю.В. Кочевалин, Н.В. Степанов. "Экспериментальные и расчетные исследования сечений реакций глубокого расщепления кобальта-59 протонами с энергией 1.2 ГэВ." Proc. II Int. Sem. on Proton Accelerator Based Transmutation of Long-Lived Radioactive Wastes and Utilization of Weapon Plutonium, Moscow, Russia, May 23-27, 1994, ITER, Moscow, Parts I and II, 1994, 85-97.
3. H.Takada, S.Meigo, T.Sasa, T.Fukahori, V.I. Belyakov-Bodin, G.I. Krupny, Yu.E. Titarenko. "Analysis of reaction rate distributions on a thick tungsten target bombarded with protons of 0.8 to 1.2 GeV." 4th International Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Sep. 11-13, Mito, Japan, 1996, 1-11.
4. Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, A.F. Smolyakov, M.M. Igumnov, S.G. Mashnik, T.A. Gabriel, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, V.F. Batyaev, O.V. Shvedov. "Experimental and Theoretical Study of Radionuclide Production on the Electronuclear Plant Target and Construction Materials Irradiated by 1.5 GeV and 130 MeV Protons." Proc. Int. Workshop "Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste: Problems, Perspectives, Cooperative Research", Dubna, Russia, May 29-31, 1996, Eds. M.Kh. Khankhasayev, Zh.B. Kurmanov and H.S. Plendl, Singapore: World Scientific, 1997, pp. 207-215.
5. Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, A.F. Smolyakov, M.M. Igumnov, S.G. Mashnik, T.A. Gabriel, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, V.F. Batyaev, O.V. Shvedov. "Experimental and Theoretical Study of Radionuclide Production on the Electronuclear Plant Target and Construction Materials Irradiated by 1.5 GeV and 130 MeV Protons." Proc. Second Int. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3-7, 1996, H. Conde, Ed., Uppsala University, 1997, vol. 2, pp. 585-591.

6. Ю.Е.Титаренко, Е.И.Карпихин, А.Ф.Смоляков, М.М.Игумнов, О.В.Шведов, Н.В.Степанов, В.Д.Казарицкий, В.Ф.Батяев, С.Г.Машник, Т.А.Габриель. "Экспериментальные и расчетные исследования образования радиоактивных ядер-продуктов в мишенных и конструкционных материалах электроядерных установок, облучаемых протонами с энергией 1.5 ГэВ и 130 МэВ." Материалы XI Международного семинара по точным измерениям в ядерной спектроскопии. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997, ТИЯС-XI, Спец. выпуск, 184-190.
7. Ю.Е. Титаренко, Е.И. Карпихин, М.М. Игумнов, О.В. Шведов, В.И. Волк, А.Ю. Вахрушин, С.В. Шепельков. "Экспериментальное определение резонансного поглощения нейтронов в тяжеловодном растворе ^{237}Np ." Материалы XI Международного семинара по точным измерениям в ядерной спектроскопии. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997, ТИЯС-XI, Спец. Выпуск, 215-222.
8. Ю.Е. Титаренко, О.В. Шведов, Е.И. Карпихин, М.М. Игумнов, А.В. Лопаткин, В.И. Волк. "Экспериментальное определение и расчетное моделирование эффектов реактивности и скоростей реакций, чувствительных к различным областям энергетического спектра нейтронов в гомогенных тяжеловодных ториевых растворах." Материалы XI Международного семинара по точным измерениям в ядерной спектроскопии. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997, ТИЯС-XI, Спец. Выпуск, 205-214.
9. Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.I. Belyakov-Bodin, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, S.G. Mashnik, A.N. Sosnin, T. Gabriel, M. Chadwick. "Theoretical Modeling of Reaction Rates on Tungsten Target under 1 GeV Proton Bombardment." -- Int. Conf. on Nucl. Data for Science and Technology, May 19-24, 1997, Trieste, Italy, Abstract Book, p. 227 (1997); Section 7 *Fission product transmutation and actinide recycling*, Talk # 20, (abstract # 531): <http://nudace.arcoveggio.enea.it/cgi-bin/show-abs.pl?Name=07-Batyaev3>
10. Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, S.G. Mashnik, A.N. Sosnin, M.B. Chadwick, T.A. Gabriel, R. Michel, M. Gloris, R.E. Prael, and M. Blann. Experimental Study and Theoretical Simulation of Radionuclide Production in ^{99}Tc Irradiated by Protons of Intermediate Energies. -- Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Science and Technology, May 19-24, 1997, Trieste, Italy. Italian Physics Society, Conference Proceedings, Eds.: G. Reffo, A. Ventura, and C. Grandi, Vol. 59, Part II, Bologna, Italy 1997, 1300-1303.
11. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, E.I. Karpikhin, A.B. Koldobsky, V.M. Zhivun, R. Michel, M. Gloris, S.G. Mashnik, A.N. Sosnin, V.F. Batyaev, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, M.B. Chadwick, R.E. Prael, T.A. Gabriel, M. Blann. "Experimental and theoretical study of the Yields of Residual Product Nuclei Produced in Thin targets irradiated by 100-2600 MeV protons", Consultancy on preparation of a data base of existing and planned experimental facilities for accelerator driven system related R&D, ITEP, Moscow, Russian Federation, 24-27 June, 1997. Working Material "Data base of experimental facilities and computer codes for accelerator-driven systems related R&D". IAEA release, chapter "ITEP", 1-11.
12. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, M.M. Igumnov, R. Michel, S.G. Mashnik, E.I. Karpikhin, V.D. Kazaritsky, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, V.M. Zhivun, A.N. Sosnin, R.E. Prael, M.B. Chadwick, T.A. Gabriel, M. Blann. "Experimental and Computer Simulation Study of the Radionuclides Produced in Thin ^{209}Bi Targets by 130 MeV and 1.5 GeV Proton-Induced Reactions." -- Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-97-3787, Los Alamos (1997); Eprint: nucl-th/9709056.

13. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, M.M. Igumnov, S.G. Mashnik, E.I. Karpikhin, V.D. Kazaritsky, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, V.M. Zhivun, A.N. Sosnin, R.E. Prael, M.B. Chadwick, T.A. Gabriel, M. Blann. "Experimental and Computer Simulation Study of the Radionuclides Produced in Thin ^{209}Bi Targets by 130 MeV and 1.5 GeV Proton-Induced Reactions." -- Nucl. Instr. Meth. A (1998), v. 414, No. 1, 73-99.
14. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, E.I. Karpikhin, V.M. Zhivun, A.B. Koldobsky, M.M. Igumnov, I.S. Sklokin, R.D. Mulambetov, A.N. Sosnin, H. Yasuda, H. Takada, S. Chiba, Y. Kasugai, S.G. Mashrik, R.E. Prael, M.B. Chadwick, T.A. Gabriel, and M. Blann. "Experimental and Computer Simulation Study of Radionuclide Yields in the ADT Materials Irradiated with Intermediate Energy Protons." -- Proc. 3d Specialists' Meeting on High Energy Nuclear Data, March 30-31, 1998, JAERI, Tokai, Ibaraki-ken, Japan, Ed., T. Fukahori JAERI-Conf 98-016, November 1998, 125-135.
15. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, E.I. Karpikhin, A.B. Koldobsky, V.M. Zhivun, R. Michel, M. Gloris, S.G. Mashnik, A.N. Sosnin, V.F. Batyaev, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, M.B. Chadwick, R.E. Prael, T.A. Gabriel, M. Blann. "Consultancy on review the draft of a data-base of experimental facilities and computer codes for accelerator-driven systems related R&D", Москва, ИТЭФ, 27-31 июля 1998., CD-ROM edition 2000-05-30 "Database for ADS R&D".
16. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, M.M. Igumnov, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, V.I. Volk, A.Yu. Vakhrushin, S.V. Shepelkov, A.V. Lopatkin, S.G. Mashnik, T.A. Gabriel. "Experimental Determination of the Resonance Integral for ^{237}Np in a Heavy Water Solution." Nucl. Sci. Eng. (1999), vol. 131, No. 1, 96-106.
17. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, M.M. Igumnov, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.V. Lopatkin, V.I. Volk, A.Yu. Vakhrushin, S.V. Shepelkov, S.G. Mashnik, and T.A. Gabriel. "Experimental Determination and Simulation of the Reactivity Effects and Reaction Rate Sensitivity to Different Ranges of Neutron Energy in Homogeneous Heavy Water Solutions of Thorium." -- Nucl. Sci. Eng. (1998), Vol. 130, No. 2, 165-180.
18. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, E.I. Karpikhin, V.M. Zhivun, A.B. Koldobsky, M.M. Igumnov, I.S. Sklokin, R.D. Mulambetov, A.N. Sosnin, H. Yasuda, H. Takada, S. Chiba, Y. Kasugai, S.G. Mashnik, R.E. Prael, M.B. Chadwick, T.A. Gabriel, and M. Blann. "Experimental and Computer Simulation Study of Radionuclide Formation in the ADT Materials Irradiated with Intermediate Energy Protons." -- Proc. Second Int. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98), Gatlinburg, TN, USA, September 20-23, 1998, 164-171.
19. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, E.I. Karpikhin, M.M. Igumnov, V.I. Volk, A.Yu. Vakhrushin, S.V. Shepelkov, A.V. Lopatkin, A.N. Sosnin, S.G. Mashnik, R.E. Prael, M.B. Chadwick, and T.A. Gabriel. "Experimental Measurement and Computer Simulation of Integral Parameters of Subcritical Systems Based on Accelerator-Driven Neutron Source." -- Proc. Second Int. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98), Gatlinburg, TN, USA, September 20-23, 1998, 172-176.
20. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, E.I. Karpikhin, V.M. Zhivun, A.B. Koldobsky, R.D. Mulambetov, A.N. Sosnin, H. Yasuda, H. Takada, S. Chiba, Y. Kasugai, S.G. Mashnik, R.E. Prael, M.B. Chadwick, T.A. Gabriel, and M. Blann. "Study of Comparative Reliability of Computer Simulation Codes in Estimating the Cross Sections for Intermediate-Energy Proton Interactions with Nuclei of ADT

Materials." – Proc. Int. Conf. "Heavy Liquid Metal Cooling in Nuclear Technology", Obninsk, Russia, October 5-9, 1998, 284-294.

21. Ю.Е.Титаренко, О.В.Шведов, В.Ф.Батяев, Е.И.Карпихин, В.М. Живун, А.Б. Колдобский, М.М.Игумнов, Р.Д. Муламбетов, А.Н. Соснин, Н. Yasuda, H. Takada, S. Chiba, Y. Kasugai, S. G. Mashnik, R. E. Prael, M. V. Chadwick, T. A. Gabriel, M. Blann. "Экспериментальные измерения выходов радиоактивных ядер-продуктов в тонких мишенях из АДТ-материалов при облучении протонами промежуточных энергий." Научная сессия МИФИ-99, Сборник научных трудов, М., 1999, т.5, с. 232.
22. Ю.Е.Титаренко, О.В.Шведов, В.Ф.Батяев, Е.И.Карпихин, В.М. Живун, А.Б. Колдобский, М.М.Игумнов, Р.Д. Муламбетов, А.Н. Соснин, Н. Yasuda, H. Takada, S. Chiba, Y. Kasugai, S. G. Mashnik, R. E. Prael, M. V. Chadwick, T. A. Gabriel, M. Blann. "Исследования сравнительной работоспособности расчетных программ, моделирующих взаимодействия ядер АДТ-материалов с протонами промежуточных энергий." Научная сессия МИФИ-99, Сборник научных трудов, М., 1999, т.5, с. 233.
23. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Eugeny I. Karpikhin, Valery M. Zhivun, Ruslan D. Mulambetov, Andrey N. Sosnin, Stepan G. Mashnik, Richard E. Prael, Tony A. Gabriel, Marshall Blann "Experimental and theoretical study of the yields of radionuclides produced in ^{59}Co thin and stacked targets irradiated by 70 – 200 MeV protons," Proc. 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha (Pruhonice), 7-11 June 1999, Czech Republic (Paper # P-C27 on the Web page http://www.fjfi.cvut.cz/con_adtt99/).
24. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Eugeny I. Karpikhin, Valery M. Zhivun, Ruslan D. Mulambetov, Andrey N. Sosnin, Stepan G. Mashnik, Richard E. Prael, Mark B. Chadwick, Tony A. Gabriel, Marshall Blann "Experimental and theoretical study of the yields of radioactive product nuclei in ^{99}Tc thin targets irradiated by 100-2600 MeV protons", Proc. 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha (Pruhonice), 7-11 June 1999, Czech Republic (Paper # P-C26 on the Web page http://www.fjfi.cvut.cz/con_adtt99/).
25. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Eugeny I. Karpikhin, Valery M. Zhivun, Aleksander B. Koldobsky, Ruslan D. Mulambetov, Andrey N. Sosnin, Yuri N. Shubin, Anatoly V. Ignatyuk, Vladimir P. Lunev, Stepan G. Mashnik, Richard E. Prael, Tony A. Gabriel, Marshall Blann "Experimental and theoretical study of the yields of radionuclides produced in ^{232}Th thin targets irradiated by 100 and 800 MeV protons", Proc. 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha (Pruhonice), 7-11 June 1999, Czech Republic (Paper # P-C24 on the Web page http://www.fjfi.cvut.cz/con_adtt99/).
26. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Eugeny I. Karpikhin, Valery M. Zhivun, Aleksander B. Koldobsky, Ruslan D. Mulambetov, Andrey N. Sosnin, Yuri N. Shubin, Anatoly V. Ignatyuk, Vladimir P. Lunev, Stepan G. Mashnik, Richard E. Prael, Tony A. Gabriel, Marshall Blann "Experimental and Theoretical Study of the Yields of Radionuclides Produced in ^{238}U Thin Targets Irradiated by 100 and 800 MeV Protons", Proc. 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha (Pruhonice), 7-11 June 1999, Czech Republic (Paper # P-C25 on the Web page http://www.fjfi.cvut.cz/con_adtt99/).

27. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, R. D. Mulambetov, A. N. Sosnin S. G. Mashnik, R. E. Prael, T. A. Gabriel, M. Blann, "Experimental and computer simulation study of radionuclide production in heavy materials irradiated by intermediate energy protons", 3rd International Topical meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'99), Long Beach, CA, USA, November 14-18, 1999, 212-223.
28. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, R. D. Mulambetov, S. G. Mashnik, R. E. Prael, W.B. Wilson, "Experimental and computer simulation study of radioactivity of materials irradiated by intermediate energy protons", 3rd International Topical meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'99), Long Beach, CA, USA, November 14-18, 1999 203-211.
29. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, A. B. Koldobsky, R. D. Mulambetov, A. N. Sosnin, S.G. Mashnik, R.E. Prael, T. A. Gabriel, and M. Blann, "Experimental and Computer Simulation Study of Radionuclide Production in Heavy Materials Irradiated by Intermediate Energy Protons", – LANL Report LA-UR-99-4489; nucl-ex/9908012
30. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, R. D. Mulambetov, S.G. Mashnik, R.E. Prael, W. B. Wilson, "Experimental and Computer Simulation Study of Radioactivity of Materials Irradiated by Intermediate Energy Protons". – LANL Report LA-UR-99-4090, nucl-ex/9908015.
31. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, E.I. Karpikhin, A.B. Koldobsky, V.M. Zhivun, R. Michel, M. Gloris, S.G. Mashnik, A.N. Sosnin, V.F. Batyaev, N.V. Stepanov, V.D. Kazaritsky, M.B. Chadwick, R.E. Prael, T.A. Gabriel, and M. Blann. "Experimental and Theoretical Study of the Yields of Residual Product Nuclei Produced in Thin Targets Irradiated by 100-2600 MeV Protons." – Consultancy on Preparation of a Data-Base of Existing and Planned Experimental Facilities for Accelerator-Driven System Related R&D, ITEP, Moscow, Russian Federation, 28-30 July 1999, <http://beta.aitart.ru/alu/adstsb/mitings.asp>.
32. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, R. D. Mulambetov, S. G. Mashnik, R. E. Prael, W.B. Wilson, "Experimental and computer simulation study of radioactivity of materials irradiated with protons of intermediate energies", Электроядерные системы в перспективной ядерной энергетике. Труды международной конференции, М., ИТЭФ, 11-15 октября 1999, 184-193.
33. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, R. D. Mulambetov, S. G. Mashnik, R. E. Prael, M. Blann, "Nuclear Product Yield in ^{99}Tc transmutation under 0.1-2.6 GeV proton bombardment", Электроядерные системы в перспективной ядерной энергетике. Труды международной конференции, М., ИТЭФ, 11-15 октября 1999, 204-211.
34. Yu.E. Titarenko, O.V. Shvedov, V.F. Batyaev, E.I. Karpikhin, V.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, "spallation and fission reaction products in ^{209}Bi and $^{206,207,208,209}\text{natPb}$ irradiated by 1.5 GeV protons", Электроядерные системы в перспективной ядерной энергетике. Труды международной конференции, М., ИТЭФ, 11-15 октября 1999, 194 -199.
35. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Valery M. Zhivun, Evgeny I. Karpikhin, Ruslan D. Mulambetov, Dmitry V. Fischenko, Svetlana V. Kvasova, Stepan G. Mashnik, Richard E. Prael, and Arnold J. Sierk, "Study of Residual Product Nuclide Yields in 1.0 GeV Proton Irradiated ^{208}Pb and 2.6 GeV Proton Irradiated ^{238}W Thin Targets," LANL Report, LA-UR-00-3597; E-print nucl-

- ex/0008011; Proc. Int. Workshop "Shielding Aspects of Accelerators, Irradiation and Target Facilities (SATIF-5)," OECD Headquarters, Paris, France, July 20-21, 2000.
36. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Valery M. Zhivun, Evgeny I. Karpikhin, Aleksander B. Koldobsky, Ruslan D. Mulambetov, Dmitry V. Fischenko, Svetlana V. Kvasova, Stepan G. Mashnik, and Richard E. Prael, "Study of Residual Nuclide Yields From 0.1, 0.2, 0.6, and 1.6 GeV Proton-Irradiated Thin ^{201}Hg Targets," LANL Report, LA-UR-00-3600; E-print nucl-ex/0008012; Proc. Int. Workshop "Shielding Aspects of Accelerators, Irradiation and Target Facilities (SATIF-5)," OECD Headquarters, Paris, France, July 20-21, 2000.
37. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Evgeny I. Karpikhin, Valery M. Zhivun, Aleksander B. Koldobsky, Ruslan D. Mulambetov, Dmitry V. Fischenko, Svetlana V. Kvasova, Andrey M. Voloschenko, Stepan G. Mashnik, and Richard E. Prael, "Threshold Reaction Rates Inside and on the Surface of a Thick W-Na Target Irradiated with 0.8 GeV Protons," Proc. Int. Workshop "Shielding Aspects of Accelerators, Irradiation and Target Facilities (SATIF-5)," LANL Report, LA-UR-00-3599; E-print nucl-ex/0008014; OECD Headquarters, Paris, France, July 20-21, 2000.
38. Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, A. B. Koldobsky, R. D. Mulambetov, D. V. Fischenko, S. V. Kvasova, A. N. Sosnin, S. G. Mashnik, R. E. Prael, and A. J. Sierk, T. A. Gabriel, M. Saito, and H. Yasuda, "Cross Sections for Nuclide Production in 1 GeV Proton-Irradiated ^{208}Pb ," LANL Report LA-UR-00-4779 (2000).
39. Yury E. Titarenko, Oleg V. Shvedov, Vyacheslav F. Batyaev, Valery M. Zhivun, Evgeny I. Karpikhin, Ruslan D. Mulambetov, Dmitry V. Fischenko, Svetlana V. Kvasova, Stepan G. Mashnik, Richard E. Prael, and Arnold J. Sierk, "Fission Product Yields in Hybrid (ADS) Target Materials Induced by High-Energy Protons," LANL Report, LA-UR-00-5848; Proc. XV-th Int. Workshop on Fission Physics, Obninsk, Russia, October 2-6, 2000; <http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00393817.pdf>.
40. Ю.Е. Титаренко, И.Ф. Батяев, О.В. Шведов, В.М. Живун, А.Б. Колдобский, Р.Д. Муламбетов, Е.И. Карпихин, С.В. Квасова, Д.В. Фищенко, Ю.В. Требуховский. "Перспективы создания электроядерных установок с внешним источником нейтронов (ЭЛЯУ) для трансмутации долгоживущих отходов ядерной энергетики.", Физические проблемы эффективного использования и безопасного обращения с ядерным топливом. Волга – 2000. Материалы XI семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 4-8 сентября 2000г., с. 197.

Подписано к печати

08.02.01

Формат 60x90

1/16

Усл. – печ. л. 2,4.

Тираж 100 экз.

Заказ № 476

Отпечатано в ИТЭФ, 117259, Москва, Б.Черемушкинская, 25
