

На правах рукописи



Чаузова Мария Владимировна

**Измерение сечений образования долгоживущих продуктов
протон-ядерных реакций в конструкционных материалах
электроядерных установок**

Специальность: 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, г. Москва).

Научный *Титаренко Юрий Ефимович*

руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории фундаментальных ядерно-физических исследований НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, г. Москва.

Официальные *Соболевский Николай Михайлович*

оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории нейтронных исследований ФГБУН Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва;

Ужинский Владимир Витальевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Ведущая Научно-исследовательский институт ядерной физики
организация: имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,
г. Москва.

Защита диссертации состоится 2 декабря 2020 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 520.009.03 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, ул. Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 520.009.03,
д-р физ.-мат. наук, доцент

 А.Л. Барабанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Одним из приоритетных направлений развития атомной энергетики является использование электроядерных установок (ЭЛЯУ) для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов, которая рассматривается в качестве альтернативы их захоронению в глубоких пластах геологических формаций, и для наработки нового ядерного топлива, например, ^{233}U , необходимость в котором обусловлена недостатком ресурсов природного урана с приемлемой стоимостью извлечения. Однако в процессе эксплуатации ЭЛЯУ происходит образование вторичных радиоактивных продуктов реакций в нейтронопроизводящих мишенях ЭЛЯУ под воздействием высокоэнергетических и высокоинтенсивных потоков протонов и нейтронов. Спектр этих продуктов реакций существенно отличается от спектра продуктов деления, выходы которых хорошо изучены.

Наибольший интерес представляют долгоживущие радионуклиды-продукты адрон-ядерных реакций, поскольку они определяют долгосрочную радиологическую опасность облученных материалов, и среди них следует отметить тритий (^3H), образование которого сказывается не только на механических и эксплуатационных свойствах конструкционных материалов, но вызывает дополнительные экологические проблемы, обусловленные его высокой миграционной и мутагенной способностями. При этом ^3H , являясь чистым бета-излучателем, не может быть измерен напрямую в облученных материалах, поэтому требуется разработка методов его извлечения и определения сечений образования с учетом возможных потерь.

Изучение сечений протон-ядерных реакций (как независимых, когда продукт реакции образуется только в ходе ядерной реакции, так и кумулятивных, когда продукт реакции образуется в результате всех процессов: в ходе реакции и в ходе распада образовавшихся генетических предшественников) позволит более надежно предсказать количество радиоактивных изотопов, образующихся внутри мишени и окружающих ее конструкционных материалах при эксплуатации ЭЛЯУ. Физически и экономически невозможно измерить все необходимые ядерные данные, поэтому возникает потребность в разработке и развитии ядерных моделей механизма реакций и повышении их предсказательной способности. Не менее важной задачей остается верификация ядерных моделей в составе высокоэнергетических транспортных (ВЭТ) программ на основе полученных экспериментальных данных.

На сегодняшний день разработано большое число ядерных моделей в составе ВЭТ программ и ведутся работы по их совершенствованию, но достигнутые точности описания экспериментальных данных во многих случаях все еще далеки от точности, требуемой для технических приложений. Кроме того, современные ВЭТ программы не позволяют рассчитывать образование изомерных состояний ядер в протон-ядерных реакциях при энергиях, соответствующих режимам работы ЭЛЯУ, поэтому полученные экспериментальные данные могут являться безальтернативной информацией. В связи с этим задача получения экспериментальных данных об образовании радиоактивных продуктов, в том числе и долгоживущих изомеров, в конструкционных материалах мишеней ЭЛЯУ и верификации ВЭТ программ, решению которой посвящена тема представленной диссертационной работы, остается **актуальной** до настоящего времени.

Цель диссертационной работы состоит в экспериментальном определении значений сечений образования долгоживущих радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с тонкими мишенями из ^{nat}Cr , ^{56}Fe , ^{nat}Ni , ^{93}Nb , ^{nat}Ta , ^{nat}W и ^{27}Al , перспективными для использования в качестве конструкционных материалов ускорительных систем ЭЛЯУ, и оценке предсказательной способности широко применяемых в мировой практике ВЭТ программ путем сравнения экспериментальных и расчетных результатов.

В соответствии с этим можно выделить **основные задачи диссертации**:

1) сбор и анализ имеющейся экспериментальной информации о сечениях ядерных реакций $^{nat}\text{Cr}(p,x)^{44}\text{Ti}$, $^{56}\text{Fe}(p,x)^{44}\text{Ti}$, $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{44}\text{Ti}$, $^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Ti}$, $^{nat}\text{Ta}(p,x)^{178m2}\text{Hf}$, $^{nat}\text{W}(p,x)^{178m2}\text{Hf}$, в диапазоне энергий протонов от 20 до 3000 МэВ;

2) сбор и анализ имеющейся экспериментальной информации о сечениях образования ^3H в ^{27}Al , ^{nat}Ni и ^{nat}W в диапазоне энергий протонов от 20 до 3000 МэВ и методах их измерения;

3) определение кумулятивных сечений образования ^{44}Ti в ^{nat}Cr , ^{56}Fe , ^{nat}Ni , ^{93}Nb в диапазоне энергий протонов от 40 до 2600 МэВ;

4) определение независимых сечений образования $^{178m2}\text{Hf}$ в ^{nat}Ta и ^{nat}W в диапазоне энергий протонов от 40 до 2600 МэВ;

5) разработка методики измерения количества ^3H , образовавшегося в облуп-

ченном протонами образце, с применением жидкосцинтилляционной бета-спектрометрии;

6) расчет потерь ${}^3\text{H}$ из образцов во время облучения и хранения;

7) определение интегральных сечений накопления ${}^3\text{H}$, т.е. сечений для образцов конкретного состава и геометрии, и расчет независимых сечений образования ${}^3\text{H}$ в ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$ в диапазоне энергий протонов от 40 до 2600 МэВ;

8) сравнение полученных экспериментальных значений сечений образования долгоживущих радионуклидов с опубликованными ранее результатами и расчетными данными, полученными с применением различных версий моделей внутриядерного каскада в составе ВЭТ программ;

9) разработка методики расчета изомерных состояний и участие в модификации на ее основе ядерной модели SEM03.03;

10) проведение расчетов сечений образования ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ в ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$ с применением модифицированной версии каскадно-экситонной модели SEM03.03-ext.

Методы исследований

Диссертационная работа использует следующие основные методические приемы:

- гамма-спектрометрия облученных протонами образцов исследуемых материалов после выдержки в течение 5-10 лет без предварительной химической сепарации;

- жидкосцинтилляционная бета-спектрометрия с предварительным выделением ${}^3\text{H}$ из облученных протонами образцов в системе пробоподготовки A307 Sample Oxidizer;

- сопоставление полученных результатов с имеющимися экспериментальными и расчетными данными.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

1) разработана методика, в соответствии с которой определены 144 значения интегральных сечений и 33 значения независимых сечений образования ${}^3\text{H}$ в образцах из ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$, облученных протонами 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. С использованием полученных данных оценена предсказательная способность ядерных моделей SEM03.03 и INCL4.5.5;

2) определены 33 значения кумулятивных сечений образования ${}^{44}\text{Ti}$ в образцах из ${}^{\text{nat}}\text{Cr}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{93}\text{Nb}$, облученных протонами 11-ти энергий в диапа-

зоне от 40 до 2600 МэВ. Функции возбуждения для реакций ${}^{\text{nat}}\text{Cr}(p,x){}^{44}\text{Ti}$ и ${}^{93}\text{Nb}(p,x){}^{44}\text{Ti}$ получены впервые. Дополнительно определены кумулятивные сечения образования ${}^{44}\text{Sc}$. С использованием полученных данных оценена предсказательная способность семи ядерных моделей в составе ВЭТ программ: BERTINI, ISABEL, INCL4.2, CEM03.02, PHITS, INCL4.5, CASCADE07;

3) определены 19 значений независимых сечений образования изомера ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ в мишенях из ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$, облученных протонами 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. Для тонких мишеней из ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$ данные получены впервые;

4) предложена методика расчета изомерных состояний, на основании которой была модифицирована ядерная модель CEM03.03. Выполнена оценка предсказательной способности модифицированной модели CEM03.03-ext с использованием полученных данных для ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$.

На защиту выносятся:

1) методика и результаты измерений сечений образования ${}^3\text{H}$ в ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$ при энергиях протонов 40, 70, 100, 150, 250, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2600 МэВ;

2) результаты измерения кумулятивных сечений образования ${}^{44}\text{Ti}$ и ${}^{44}\text{Sc}$ в ${}^{\text{nat}}\text{Cr}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$, ${}^{93}\text{Nb}$ при облучении протонами указанных выше энергий;

3) результаты измерения независимых сечений образования ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ в ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$ при облучении протонами указанных выше энергий;

4) методика расчета сечений образования изомерных состояний продуктов протонных реакций в ядерной модели CEM03.03-ext;

5) результаты сравнения полученных экспериментальных значений сечений с соответствующими расчетными данными и определение предсказательной способности ядерных моделей в составе ВЭТ программ.

Практическое значение работы определяется:

1) возможностью применения разработанной методики измерения сечений образования ${}^3\text{H}$ для получения новых экспериментальных данных;

2) возможностью использования полученных экспериментальных данных для анализа остаточной активности узлов ЭЛЯУ, а также для верификации и совершенствования расчетных программ, применяемых при создании и эксплуатации ЭЛЯУ;

3) возможностью дополнения мировых баз данных по сечениям протон-

ядерных реакций;

4) возможностью использования предложенной методики расчета изомерных отношений для вычисления сечения образования изомера или суммарного сечения изомерного и основного состояния ядер в различных ядерных реакциях.

Достоверность полученных результатов подтверждается правильным выбором методов измерений, использованием современных средств измерений и программного обеспечения, выполнением расчетов с использованием широко известных программ моделирования, согласованием экспериментальных результатов с результатами других исследовательских групп.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: IHISM'16 JUNIOR (27 июня-3 июля 2016 г., Петрозаводск), IX International Conference "Modern problems of Nuclear physics and Nuclear technologies" (24-27 сентября 2019 г., Ташкент), Meeting of the Working Group F "Nuclear Fuel Cycle Perspectives and Sustainability" of the International organization Atomic Energy Researchers (22-25 июля 2019 г., Москва), Молодежной конференции по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2019 (25-28 ноября 2019 г., Москва).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в трех статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus и двух трудах конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения (общих выводов по диссертации), списка литературы из 112 наименований и двух приложений, имеет объем 123 страницы печатного текста, содержит 37 рисунков, 29 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** рассмотрены основные направления применения ЭЛЯУ в ядерной энергетике, в частности, их использование для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов. Обоснована актуальность исследования образования долгоживущих радионуклидов в конструкционных материалах ЭЛЯУ под воздействием высокоинтенсивных потоков протонов. Сформулированы цель и

задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** выполнено обзорное рассмотрение долгоживущих продуктов протон-ядерных реакций, образование которых возможно в конструкционных и мишенных материалах ЭЛЯУ. Приведены результаты информационного анализа международных баз ядерных данных по сечениям образования долгоживущих радионуклидов ${}^3\text{H}$, ${}^{44}\text{Ti}$ и ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ при взаимодействии протонов с алюминием, железом, хромом, никелем, ниобием, танталом и вольфрамом. Обращено внимание на существенный недостаток, а иногда и отсутствие, экспериментальных данных для ядерных реакций: ${}^{\text{nat}}\text{Cr}(p,x){}^{44}\text{Ti}$, ${}^{93}\text{Nb}(p,x){}^{44}\text{Ti}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ta}(p,x){}^{178\text{m}2}\text{Hf}$, ${}^{\text{nat}}\text{W}(p,x){}^{178\text{m}2}\text{Hf}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x){}^3\text{H}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}(p,x){}^3\text{H}$. В Главе 1 также проанализированы экспериментальные методы измерения сечений образования ${}^3\text{H}$ в металлах, применяемые в ранее опубликованных работах, отмечены их недостатки.

В **Главе 2** представлена методика экспериментального определения сечений образования j -го продукта реакции через независимые скорости образования ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ ($R_{178\text{m}2\text{Hf}}^{\text{ind}}$) и кумулятивные скорости образования ${}^{44}\text{Ti}$ ($R_{44\text{Ti}}^{\text{cum}}$) по результатам гамма-спектрометрических измерений, а также через независимые скорости образования ${}^3\text{H}$ ($R_{3\text{H}}^{\text{ind}}$) по результатам бета-спектрометрических измерений. В этом случае формула для расчета сечения образования j -го продукта реакции имеет вид:

$$\sigma_j^{\text{cum/ind}} = \frac{R_j^{\text{cum/ind}}}{\hat{\Phi}_{St}}, \quad j = {}^{44}\text{Ti}, {}^{178\text{m}2}\text{Hf}, {}^3\text{H}; \quad (1)$$

где $\sigma_j^{\text{cum/ind}}$ – кумулятивное/независимое сечение j -го продукта реакции; $\hat{\Phi}_{St}$ – плотность потока протонов, определенная с помощью мониторинговой реакции ${}^{27}\text{Al}(p,x){}^{22}\text{Na}$.

Формулы для расчета скоростей образования ${}^{44}\text{Ti}$ и ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ в образцах по интенсивности нескольких гамма-линий приведены в тексте диссертации. Независимые скорости образования ${}^3\text{H}$ в образцах рассчитывались по формуле:

$$R_{3\text{H}}^{\text{ind}} = \frac{A_{3\text{H}} \cdot k_g \cdot k_d}{N_{\text{tag}} \cdot \lambda_{3\text{H}}} \cdot \frac{1}{t_{\text{irr}}}, \quad (2)$$

где $A_{3\text{H}}$ – активность ${}^3\text{H}$, приведенная к концу облучения, Бк; N_{tag} – число ядер

металла в образце; λ_{3H} – постоянная распада 3H , s^{-1} ; k_g – геометрическая поправка, учитывающая потери ядер 3H за счет их вылета из объема образца во время облучения; k_d – диффузионная поправка, учитывающая потери 3H за счет его выхода из образца в окружающую среду за время хранения; t_{irr} – время облучения, с (так как $t_{irr} \ll T_{1/2}^{3H} = 12,33$ года, поправкой на распад 3H за время облучения можно пренебречь).

Геометрическая и диффузионная поправки в формуле (2) для каждого образца отдельно были получены расчетным путем, исходя из оценки потерь 3H .

Оценка потерь 3H из облученных образцов за время хранения была выполнена с использованием модели, рассматривающей три состояния водорода в равновесии с металлом (газ – хемосорбированный монослой – твердый раствор) и описывающей переходы между этими состояниями аррениусовской кинетикой. Проведенные расчеты показали, что диффузионная поправка k_d в формуле (2) не отличается от единицы с относительной неопределенностью менее 1%, что существенно ниже неопределенности измерения активности 3H .

Для оценки возможных потерь 3H за счет его вылета из образцов во время облучения и расчета геометрических поправок k_g в формуле (2) были вычислены дважды дифференциальные сечения образования ядер 3H , а также построены спектры ядер 3H во всех образцах и углероде (^{nat}C), который присутствует в полиэтилене. Расчеты проведены по программе MCNP6 с использованием ядерной модели SEM03.03. Возможные потери 3H из образцов во время облучения протонами и геометрические поправки k_g были рассчитаны методом Монте-Карло на основании полученных спектров и зависимостей пробега ионов $^3H^+$ в металле от их энергии, рассчитанных программой SRIM. Результаты оценки потерь 3H представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные потери 3H из образцов во время облучения и за время хранения

Образец	Время, прошедшее с момента облучения образцов до момента выделения 3H , лет	Потери 3H за счет диффузии, %	Потери 3H в процессе облучения, %
^{27}Al	от 5,9 до 13,6	$8,9 \cdot 10^{-8} \div 2,3 \cdot 10^{-4}$	38 \div 75
^{nat}Ni	от 7,8 до 9,5	$1,3 \cdot 10^{-8} \div 7,8 \cdot 10^{-7}$	40 \div 64
^{nat}W	от 9,9 до 11,5	$2,2 \cdot 10^{-8} \div 1,2 \cdot 10^{-6}$	55 \div 76

Неопределенности значений скоростей реакций и сечений образования радионуклидов оценивались, исходя из неопределенностей величин, входящих в формулы (1) и (2).

Глава 3 посвящена описанию постановки эксперимента. Приведены характеристики облучаемых образцов исследуемых материалов, их изотопный состав и параметры облучения.

Облучение образцов проводилось на ускорителе У-10 НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ в 2002 – 2009 гг. пучками моноэнергетических протонов 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. Образцы были собраны в «сэндвичи», которые состояли из металлического образца-мишени (^{nat}Cr , ^{56}Fe , ^{nat}Ni , ^{93}Nb , ^{nat}Ta , ^{nat}W , ^{209}Bi , $^{206,207,208,nat}\text{Pb}$) и ^{27}Al образца-монитора, помещенных в пакетики из полиэтилена толщиной 15 мкм для геометрического совмещения. Облучение образцов проводилось как в виде отдельных «сэндвичей» $\text{CH}_2+\text{Me}+\text{Al}+\text{CH}_2$ (схема такого «сэндвича» представлена на рисунке 1), так и в виде парных «сэндвичей» $\text{CH}_2+\text{Me}_1+\text{Al}_1+\text{CH}_2+\text{CH}_2+\text{Me}_2+\text{Al}_2+\text{CH}_2$. Диаметр всех образцов был 10,5 мм, толщина образцов – от 0,15 до 0,87 мм. Пакетик с образцами закреплялся на алюминиевой пластине размером 72×72 мм и толщиной 0,1 мм, которая устанавливалась перпендикулярно направлению пучка протонов.

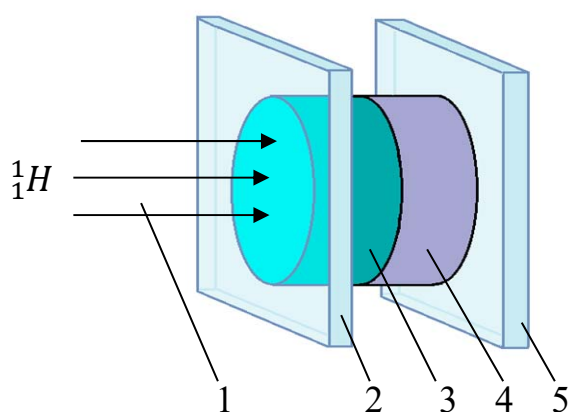


Рисунок 1 – Схема облучения экспериментальных образцов («сэндвич»).

- 1 – протонный пучок,
- 2, 5 – полиэтилен,
- 3 – образец-мишень,
- 4 – ^{27}Al образец-монитор

Скорость образования ^{44}Tl и $^{178m2}\text{Hf}$ в образцах определялась, исходя из интенсивности их собственных гамма-линий: 67,9 кэВ (94,4%) и 78,3 кэВ (96,2%) – для ^{44}Tl и 213,4 кэВ (81,4%), 216,7 кэВ (64,6%) и 574,2 кэВ (88,0%) – для $^{178m2}\text{Hf}$. Для измерения спектров ^{44}Tl использовался гамма-спектрометр на базе низкоэнергетического LEGe детектора типа GUL0110, для измерения спектров $^{178m2}\text{Hf}$ – два гамма-спектрометра на базе коаксиальных детекторов из особо чи-

стого германия типа GC2518. Обработка гамма-спектров осуществлялась с помощью пакета программ GENIE2000, который обеспечивает возможность после пакетной обработки спектров провести «Интерактивную подгонку» сложных гамма-спектров. Основные характеристики гамма-спектрометров приведены в диссертации, абсолютная эффективность регистрации детекторов, как наиболее важная характеристика, представлена на рисунке 2.

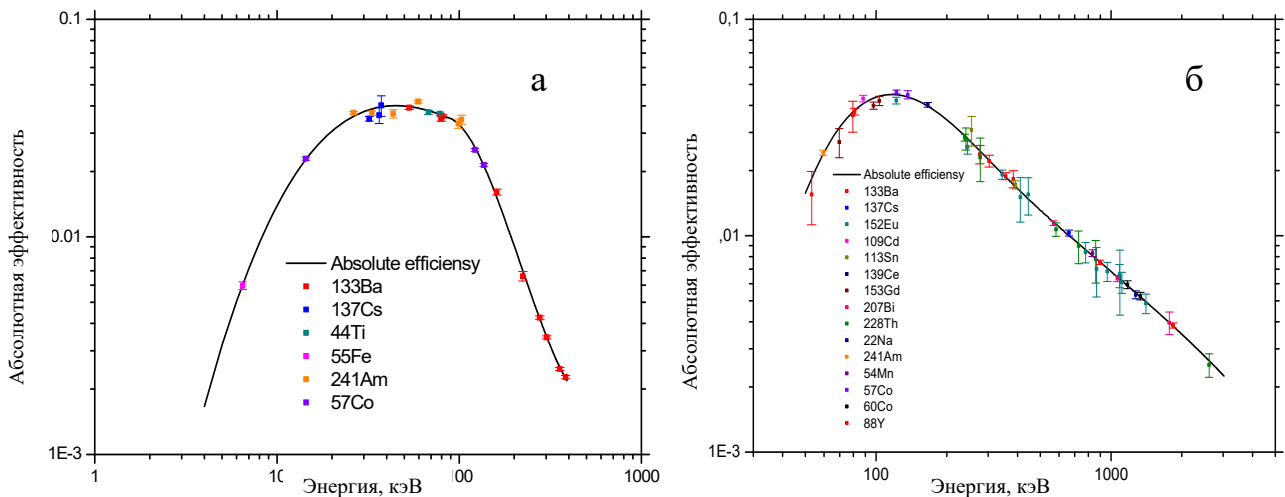


Рисунок 2 – Энергетическая зависимость эффективности регистрации гамма-спектрометров с детектором GUL0110 (а) и GC2518 (б)

Примеры гамма-спектров облученных образцов представлены на рисунках 3 и 4.

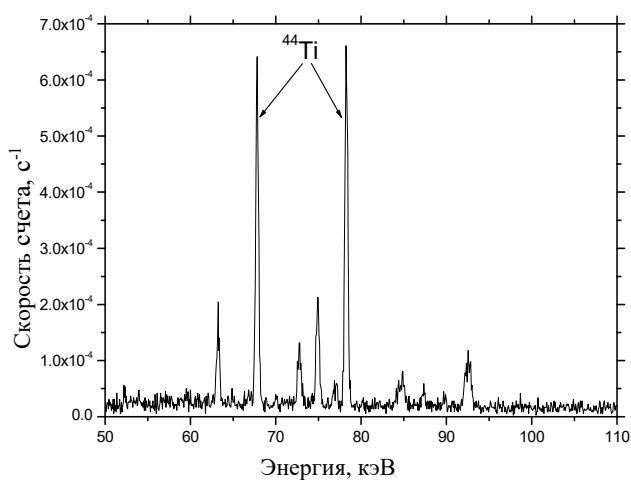


Рисунок 3 – Гамма-спектр образца из ^{56}Fe через ~7 лет после облучения протонами с энергией 400 МэВ.

Длительность измерения – 99,2 часа

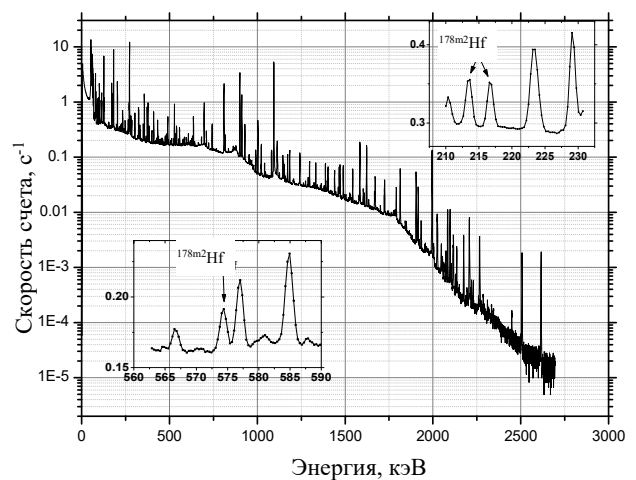


Рисунок 4 – Гамма-спектр образца из $^{\text{nat}}\text{Ta}$ через ~5 лет после облучения протонами с энергией 600 МэВ.

Длительность измерения – 168 часов

В главе также описана разработанная при выполнении диссертации методика измерения активности ^3H , образовавшегося в облученных образцах из ^{27}Al , $^{\text{nat}}\text{Ni}$ и $^{\text{nat}}\text{W}$. На первом этапе проводилось выделение ^3H из образцов в атмосфере кислорода с использованием системы автоматической пробоподготовки A307 Sample Oxidizer, схематически процесс выделения ^3H представлен на рисунке 5. Для удержания образцов в запальной корзине были специально разработаны и изготовлены кварцевые тигли. Использование такой системы позволяет количественно переводить весь выделившийся ^3H в счетный образец и контролировать остаточное загрязнение трактов.

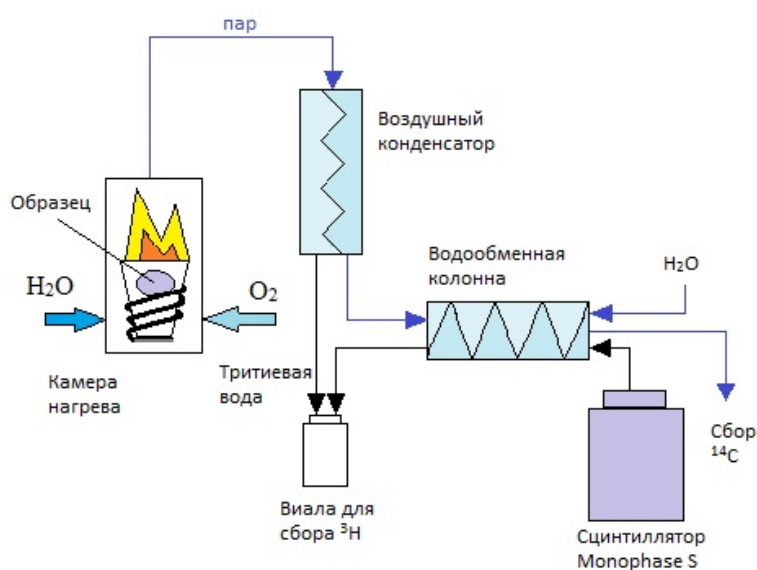


Рисунок 5 – Схема выделения ^3H из облученных образцов

Для оценки полноты выделения ^3H из образцов проводился повторный цикл окисления в системе Sample Oxidizer и дополнительно в системе Purolyser, в которой организован более длительный и высокотемпературный (до 900°C) нагрев. Было установлено, что в данных условиях практически полный выход ^3H достигается за один цикл окисления в Sample Oxidizer.

Активность ^3H , выделенного из образцов, измерялась с использованием низкофонового жидкосцинтилляционного спектрометра Quantilus 1220, обработка полученных бета-спектров проводилась в программе RadSpectraDec, которая позволяет разделять непрерывный аппаратный спектр на элементарные спектры отдельных радионуклидов из предварительно подготовленной библиотеки. На рисунке 6 представлен пример измеренного и обработанного бета-спектра, в нем присутствует только бета-излучение ^3H .

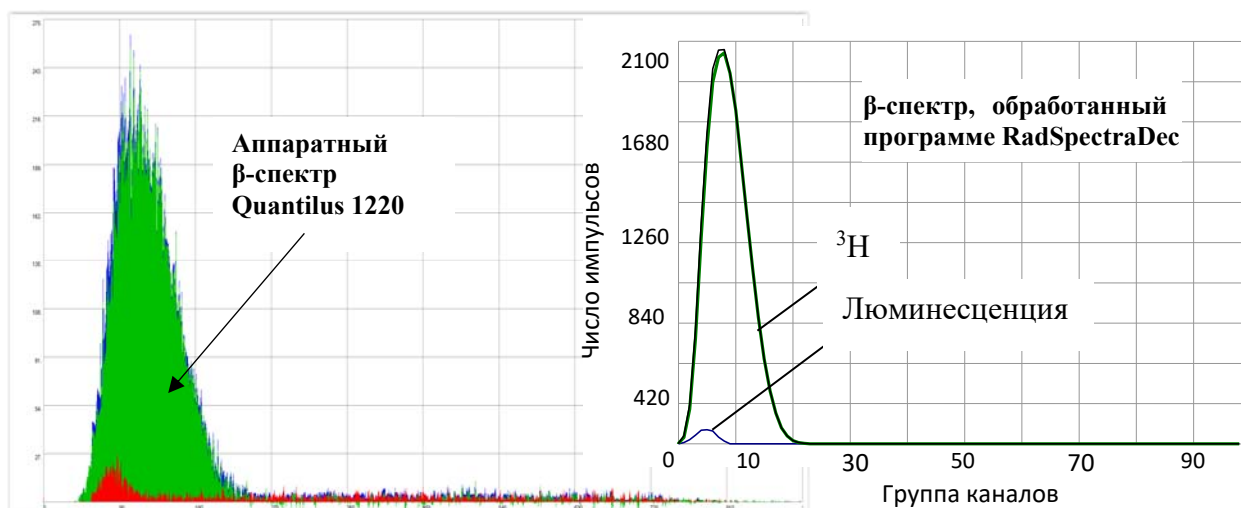


Рисунок 6 – Измеренный (аппаратный) и обработанный в программе RadSpectraDec бета-спектры ^3H , выделенного из ^{27}Al образца-монитора, облученного протонами с энергией 1600 МэВ

В Главе 4 приведены результаты определения скоростей реакции и сечений образования ^{44}Ti , $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ и ^3H в образцах, облученных протонами 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. Всего в диссертации было определено:

- для реакции $^{\text{nat}}\text{Cr}(p,x)^{44}\text{Ti}$ – 10 значений кумулятивных сечений, данные получены впервые;
- для реакции $^{56}\text{Fe}(p,x)^{44}\text{Ti}$ – 11 значений кумулятивных сечений;
- для реакции $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^{44}\text{Ti}$ – 9 значений кумулятивных сечений;
- для реакций $^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Ti}$ – 3 значений кумулятивных сечения, данные получены впервые;
- для реакции $^{\text{nat}}\text{Ta}(p,x)^{178\text{m}2}\text{Hf}$ – 11 значений независимых сечений, для тонких мишеней данные получены впервые;
- для реакции $^{\text{nat}}\text{W}(p,x)^{178\text{m}2}\text{Hf}$ – 8 значений независимых сечений;
- для реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^3\text{H}$ – 118 значений интегральных и 11 значений независимых сечений;
- для реакции $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^3\text{H}$ – 11 значений интегральных и 11 значений независимых сечений;
- для реакции $^{\text{nat}}\text{W}(p,x)^3\text{H}$ – 15 значений интегральных и 11 значений независимых сечений.

С использованием полученных экспериментальных данных дополнительно были рассчитаны кумулятивные сечения образования ^{44}Sc в $^{\text{nat}}\text{Cr}$, ^{56}Fe , $^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ^{93}Nb , которые также представлены впервые.

Для оценки надежности полученных экспериментальных значений сечений в этой главе выполнено их сравнение с ранее опубликованными данными других исследовательских групп. В качестве критерия согласованности двух групп результатов рассчитан фактор среднеквадратичного отклонения для логнормального распределения $\sigma_i^{exp} / \sigma_i^{ITEP}$:

$$\langle F \rangle = 10 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\lg \left(\frac{\sigma_i^{exp}}{\sigma_i^{ITEP}} \right) \right]^2 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где σ_i^{ITEP} – экспериментальные данные, полученные в данной работе; σ_i^{exp} – опубликованные ранее данные, полученные другой исследовательской группой; N – число сечений, используемых при сравнении.

Связь фактора среднеквадратичного отклонения $\langle F \rangle$ с критериями классической статистики выражается через формулы:

$$\langle F \rangle = 10 \left([\lg(\bar{F})]^2 + [\lg(\Delta\bar{F})]^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где \bar{F} – среднее значение логнормального распределения $\sigma_i^{exp} / \sigma_i^{ITEP}$; $\Delta\bar{F}$ – значение дисперсии логнормального распределения $\sigma_i^{exp} / \sigma_i^{ITEP}$;

$$\bar{F} = 10^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\lg \left(\frac{\sigma_i^{exp}}{\sigma_i^{ITEP}} \right) \right]}, \quad (5)$$

$$\Delta\bar{F} = 10^{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\lg \left(\frac{\sigma_i^{exp}}{\sigma_i^{ITEP}} \right) - \lg(\bar{F}) \right]^2 \right)^{1/2}}. \quad (6)$$

Факторы \bar{F} и $\Delta\bar{F}$ характеризуют систематический сдвиг между двумя наборами данных и их общий разброс, соответственно. Фактор среднеквадратичного отклонения $\langle F \rangle$ сводит двухпараметрическое описание к однопараметрическому, которое более удобно для сравнения данных. Значение фактора $\langle F \rangle$ близкое к единице указывает на хорошее согласие двух наборов данных.

Сравнение показало хорошее согласие значений сечений образования ^{44}Ti и $^{178\text{m}2}\text{Hf}$, полученных в данной работе, с данными других исследований (для большинства работ фактор $\langle F \rangle$ меньше 1,3). Для сечений образования ^3H рас-

хождение между данными достигает 80% ($\langle F \rangle = 1,8$), что может быть обусловлено как большими погрешностями измерения ^3H в активационных методиках более ранних работ, так и неопределенностью расчетов геометрических и диффузионных поправок на потери ^3H .

В графическом виде результаты представлены на рисунках 7 – 15.

В **Главе 5** приведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчетного моделирования сечений образования радионуклидов и оценена предсказательная способность ядерных моделей в составе ВЭТ программ. Сравнение представлено как качественно в виде графиков, так и количественно с использованием фактора среднеквадратичного отклонения $\langle F \rangle$, \bar{F} и $\Delta\bar{F}$, рассчитанных по формулам (3) – (6) для логнормального распределения $\sigma_i^{calc} / \sigma_i^{exp}$, где σ_i^{calc} – расчетные значения сечений, σ_i^{exp} – экспериментальные данные.

Моделирование сечений образования ^{44}Tl и ^{44}Sc в образцах из ^{nat}Cr , ^{56}Fe , ^{nat}Ni и ^{93}Nb было выполнено с применением семи моделей внутриядерного каскада в составе ВЭТ программ: ISABEL, BERTINI, CEM03.02, INCL4.2+ABLA, INCL4.5+ABLA07, RHITS и CASCADE07. Поскольку все используемые ВЭТ программы рассчитывают только независимые сечения образования остаточных нуклидов, расчет кумулятивных сечений образования ^{44}Tl и проводили с учетом независимых сечений образования его предшественников в изобарной цепочке (^{44}V , ^{44}Cr и ^{44}Mn) и известных коэффициентов ветвления.

Рассчитанные кумулятивные сечения образования ^{44}Tl и ^{44}Sc представлены на рисунках 7 – 10 вместе с экспериментальными данными, полученными в данной работе, и данными других исследовательских групп. В дополнение к расчетным кривым, на рисунках приведена усредненная по моделям кривая и серым фоном показаны стандартные отклонения результатов моделирования. Это позволяет визуально отобразить качество воспроизведения экспериментальных данных в модельных расчетах.

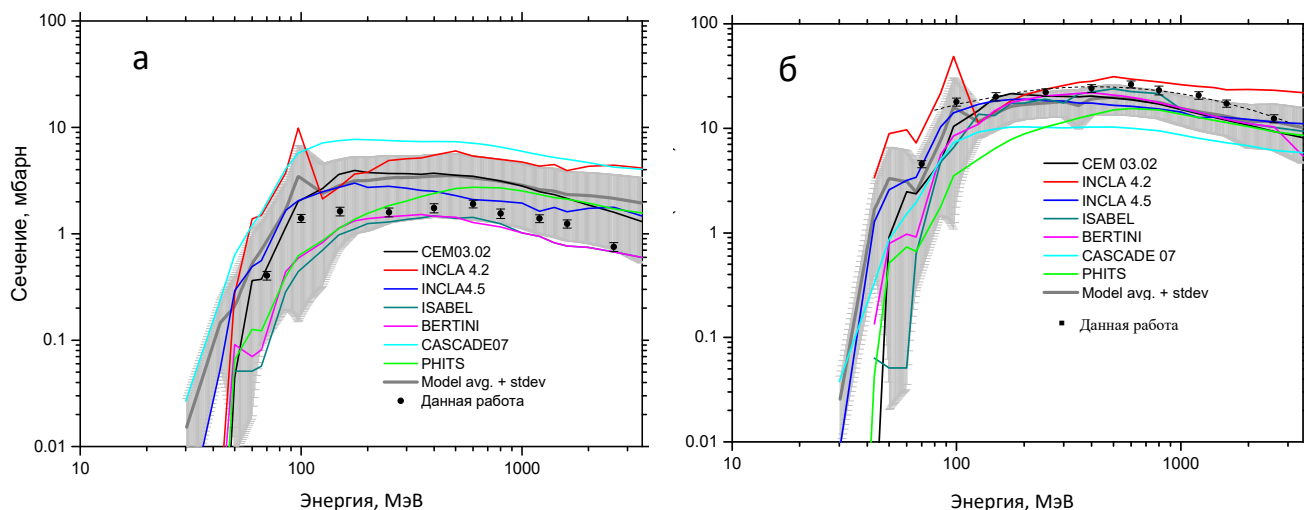


Рисунок 7 – Рассчитанные сечения и экспериментальные функции возбуждения для реакций ${}^{\text{nat}}\text{Cr}(p,x){}^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$ (а) и ${}^{\text{nat}}\text{Cr}(p,x){}^{44}\text{Sc}_{\text{cum}}$ (б)

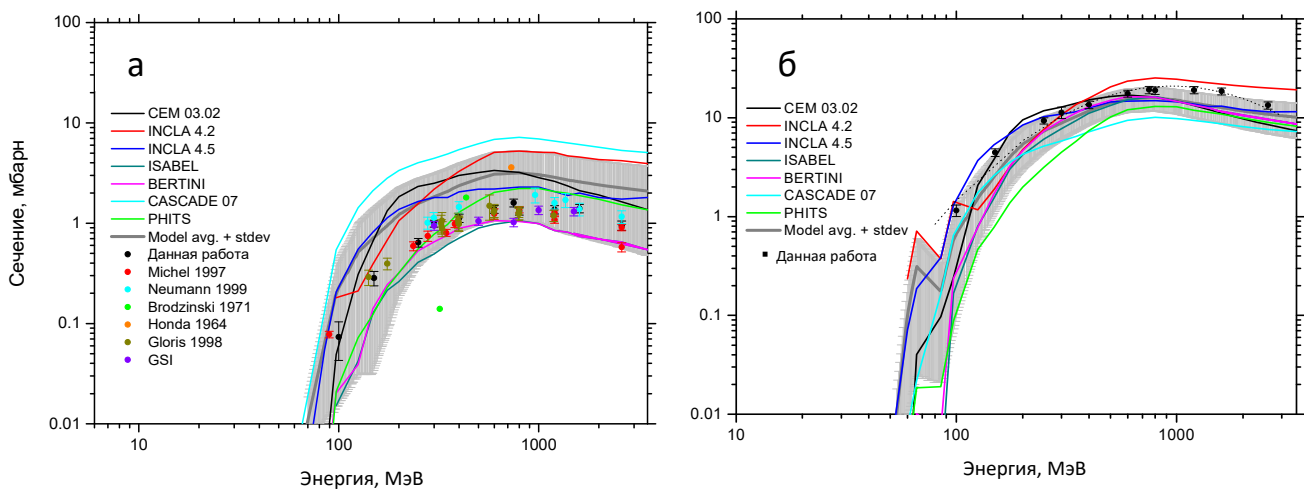


Рисунок 8 – Рассчитанные сечения и экспериментальные функции возбуждения для реакций ${}^{56}\text{Fe}(p,x){}^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$ (а) и ${}^{56}\text{Fe}(p,x){}^{44}\text{Sc}_{\text{cum}}$ (б)

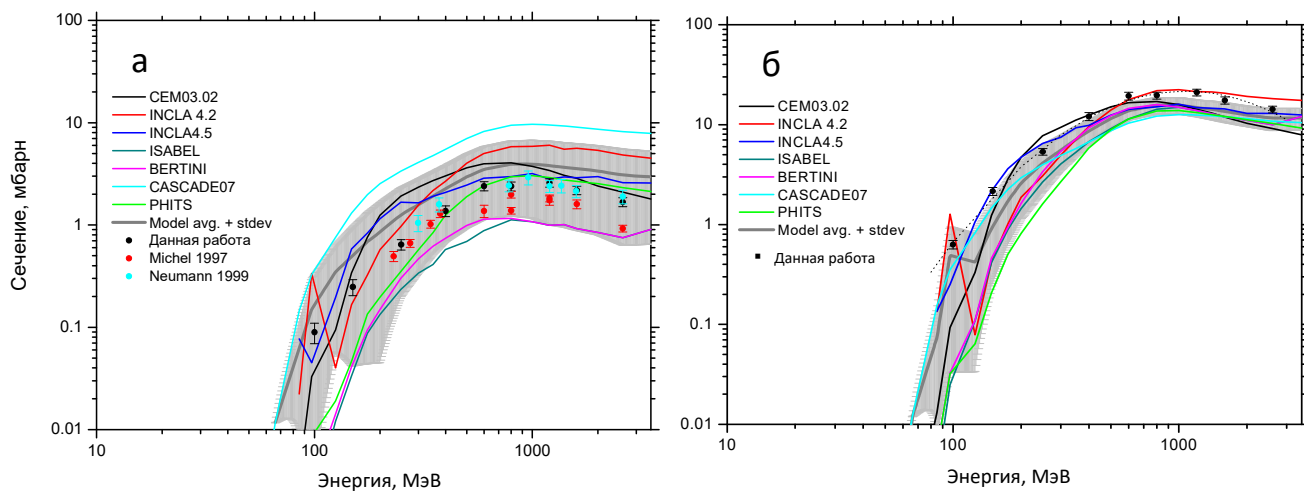


Рисунок 9 – Рассчитанные сечения и экспериментальные функции возбуждения для реакций ${}^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x){}^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$ (а) и ${}^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x){}^{44}\text{Sc}_{\text{cum}}$ (б)

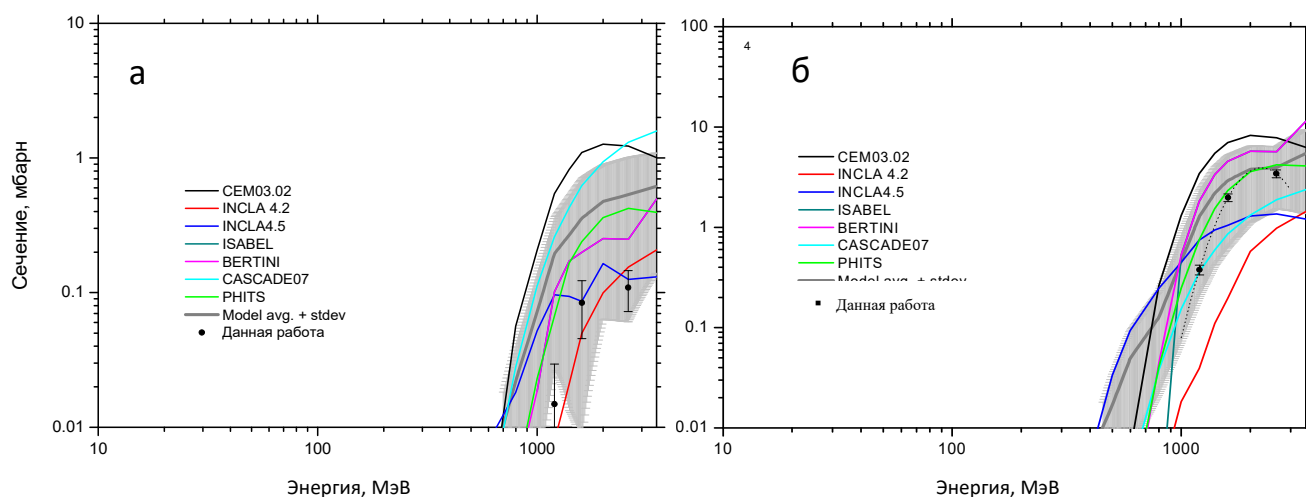


Рисунок 10 – Рассчитанные сечения и экспериментальные функции возбуждения для реакций $^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$ (а) и $^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Sc}_{\text{cum}}$ (а)

Количественная оценка предсказательной способности ядерных моделей для кумулятивных сечений ^{44}Ti и ^{44}Sc с использованием факторов $\langle F \rangle$, \bar{F} и $\Delta\bar{F}$, рассчитанных по формулам (3) – (6), (таблицы 2 и 3) показала, что расхождение между экспериментальными результатами, полученными в разных лабораториях, значительно ниже, чем расхождение между модельными расчетами и экспериментальными данными (наименьшее значение $\langle F \rangle$ подчеркнуто), при этом результаты моделирования INCL4.5+ABLA07 выглядят предпочтительнее других.

Таблица 2 – Значения статистических факторов для расчетных кумулятивных сечений образования ^{44}Ti в диапазоне энергий протонов от 40 до 2600 МэВ

Ядерная модель	$^{nat}\text{Cr}(p,x)^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$			$^{56}\text{Fe}(p,x)^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$			$^{nat}\text{Ni}(p,x)^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$			$^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Ti}_{\text{cum}}$		
	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$
CEM03.02	1,80	1,30	1,90	1,95	1,59	2,25	1,39	1,72	1,89	17,5	1,69	18,3
INCL4.2+ABLA	3,42	1,46	3,62	2,80	1,36	2,93	2,05	1,59	2,35	0,76	1,55	<u>1,68</u>
INCL4.5+ABLA07	1,46	1,23	<u>1,54</u>	1,87	1,31	1,98	1,36	1,57	<u>1,72</u>	1,97	2,33	2,95
ISABEL	0,55	1,75	2,27	0,53	1,43	2,08	0,25	2,78	5,53	3,33	1,66	3,69
BERTINI	0,62	1,54	1,90	0,60	1,38	1,84	0,31	2,33	4,28	3,33	1,66	3,69
CASCADE07	4,29	1,12	4,31	5,27	1,23	5,34	4,19	1,16	4,23	11,6	1,42	11,9
PHITS	1,09	1,87	1,88	0,94	1,74	<u>1,74</u>	0,65	2,45	2,71	3,67	1,21	3,72

Таблица 3 – Значения статистических факторов для расчетных кумулятивных сечений образования ^{44}Sc в диапазоне энергий протонов от 40 до 2600 МэВ

Ядерная модель	$^{nat}\text{Cr}(p,x)^{44}\text{Sc}_{cum}$			$^{56}\text{Fe}(p,x)^{44}\text{Sc}_{cum}$			$^{nat}\text{Ni}(p,x)^{44}\text{Sc}_{cum}$			$^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Sc}_{cum}$		
	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta\bar{F}$	$\langle F \rangle$
CEM03.02	0,73	1,20	1,44	0,76	1,64	1,76	0,67	1,82	2,05	4,19	1,78	4,68
INCL4.2+ABLA	1,32	1,40	1,55	1,06	1,42	1,43	0,87	1,85	1,88	0,14	1,63	7,39
INCL4.5+ABLA07	0,75	1,15	<u>1,38</u>	0,91	1,19	<u>1,22</u>	0,79	1,33	<u>1,45</u>	0,75	2,01	2,13
ISABEL	0,60	1,80	2,17	0,58	1,69	2,13	0,41	2,48	3,60	2,64	1,56	2,91
BERTINI	0,65	1,54	1,84	0,64	1,58	1,89	0,47	2,38	3,18	2,64	1,56	2,91
CASCADE07	0,43	1,09	2,34	0,53	1,07	1,88	0,63	1,13	1,61	0,61	1,39	1,81
PHITS	0,44	1,70	2,66	0,40	2,00	3,13	0,36	2,50	3,98	1,42	1,27	<u>1,53</u>

В главе также описана методика расчета изомерных состояний, на основании которой была модифицирована каскадно-экситонная модель CEM03.03 (модифицированная версия модели получила название CEM03.03-ext).

При проведении расчетов было установлено, что на завершающей стадии внутриядерного каскада, а также на более поздних стадиях предравновесного излучения и испарения частиц, значения угловых моментов остаточных ядер сохраняются, а их распределение очень близко к распределению плотностей ядерных уровней, описываемому формулой:

$$\Phi(J) = \frac{2J + 1}{2\Theta^2} e^{-\frac{(J+1/2)^2}{2\Theta^2}}, \quad (7)$$

где J – угловой момент; Θ – параметр отсечки спина.

Тогда изомерное отношение может быть рассчитано по формуле:

$$IR(I) = \frac{\sum_{J=I}^{\infty} \Phi(J)}{\sum_{J=0}^{\infty} \Phi(J)}, \quad (8)$$

где I – угловой момент изомера; $\Phi(J)$ – заселенность возбужденного состояния с заданным угловым моментом J на начальной стадии гамма-каскада.

Данный подход был апробирован на различных экспериментальных данных для реакций: $^{208}\text{Pb}(p,x)^{202m}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{202(m+g)}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{204m}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{204(m+g)}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{198m}\text{Au}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{198(m+g)}\text{Au}$.

Сравнение сечений образования и изомерных отношений для ^{204m}Pb , ^{202m}Pb

и ^{198m}Au в реакции $^{208}\text{Pb}(p,x)$, рассчитанных моделью SEM03.03-ext с приближением по формуле (7), и экспериментальных данных показало, что данная модель позволяет оценить изомерные соотношения высокоспиновых изомеров с неопределенностью около 15-20%, что сопоставимо с ошибками большинства экспериментальных определений этих соотношений. Однако неопределенности расчетов изомерных сечений могут быть значительно больше из-за дополнительной неопределенности суммарного ($m+g$) сечения метастабильного и основного состояний.

На рисунках 11 и 12 представлены результаты расчетов сечений образования $^{178m2}\text{Hf}$ в $^{\text{nat}}\text{Ta}$ и $^{\text{nat}}\text{W}$, выполненных с использованием модели SEM03.03-ext, в сравнении с полученными экспериментальными данными, а также в сравнении с TENDL-2015. Для оценки расхождения в основных версиях моделей внутриядерного каскада сечения образования ^{178}Hf были дополнительно промоделированы с применением модели INCL4.5+ABLA07. Как можно видеть, расхождения между результатами расчетов моделей внутриядерного каскада SEM03.03 и INCL4.5+ABLA07 могут достигать 50%.

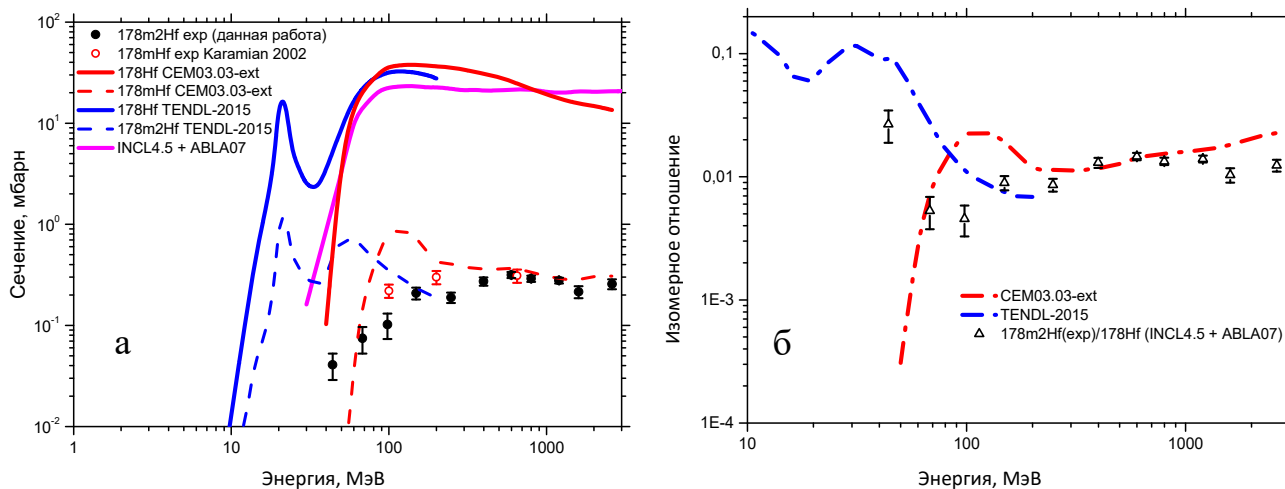


Рисунок 11 – Измеренные и рассчитанные сечения (а) и изомерные отношения (б) для реакции $^{\text{nat}}\text{Ta}(p,x)^{178m2}\text{Hf}$

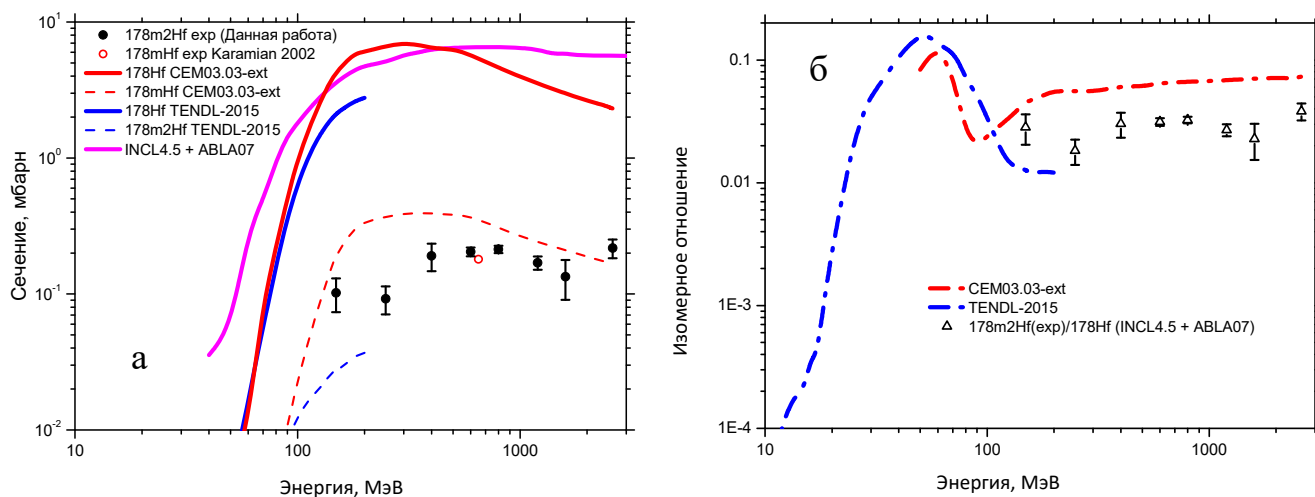


Рисунок 12 – Измеренные и рассчитанные сечения (а) и изомерные отношения (б) для реакций ${}^{\text{nat}}\text{W}(p,x){}^{178\text{m}2}\text{Hf}$

Результаты расчетов сечений образования ${}^{178\text{m}2}\text{Hf}$ и изомерных отношений моделью CEM03.03-ext для образцов из ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$ хорошо согласуются с экспериментальными данными для протонов с энергией выше 200 МэВ ($\langle F \rangle = 1,42$ для $E_p > 200$ МэВ), ниже этой энергии наблюдается расхождение расчетных данных с экспериментальными. Для образцов из ${}^{\text{nat}}\text{W}$ согласие экспериментальных данных с расчетными существенно хуже во всем диапазоне энергий ($\langle F \rangle = 2,01$ для $E_p > 200$ МэВ).

Кроме того, в главе представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных для сечений образования ${}^3\text{H}$ в ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$. Поскольку потери ${}^3\text{H}$ во время облучения оказались достаточно велики, то на первом этапе для оценки предсказательной способности ядерных моделей в диссертационной работе использовались интегральные сечения накопления ${}^3\text{H}$ без учета поправки k_g в формуле (2) (т.е. сечения накопления ${}^3\text{H}$ для «сэндвичей» в виде ячеек конкретного состава и геометрии).

Расчетное моделирование интегральных сечений накопления ${}^3\text{H}$ в тонких образцах из ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$ было выполнено с использованием ВЭТ программы MCNP6 с ядерными моделями CEM03.03 и INCL4.5.5. Для этого в расчетах задавались реальные параметры (толщина, диаметр, плотность, изотопный состав и последовательность слоев-ячеек) облучаемых «сэндвичей», включая толщину полиэтиленовых пакетиков. С использованием рассчитанных программой MCNP6 величин определялось количество ядер ${}^3\text{H}$, остановившихся в каждой ячейке, и интегральное сечение накопления ${}^3\text{H}$.

Как было сказано выше, тонкие образцы из ^{27}Al использовались в качестве мониторов потока протонов при облучении в составе всех «сэндвичей», поэтому в работе было получено большое число интегральных сечений накопления ^3H в ^{27}Al (всего 118 значений). Экспериментальные и рассчитанные интегральные сечения накопления ^3H в образцах из ^{27}Al , а также в образцах из $^{\text{nat}}\text{Ni}$ и $^{\text{nat}}\text{W}$, представлены на рисунках 13 и 14, для идентификации ^{27}Al образцов в скобках указаны металлические образцы, совместно с которыми они облучались.

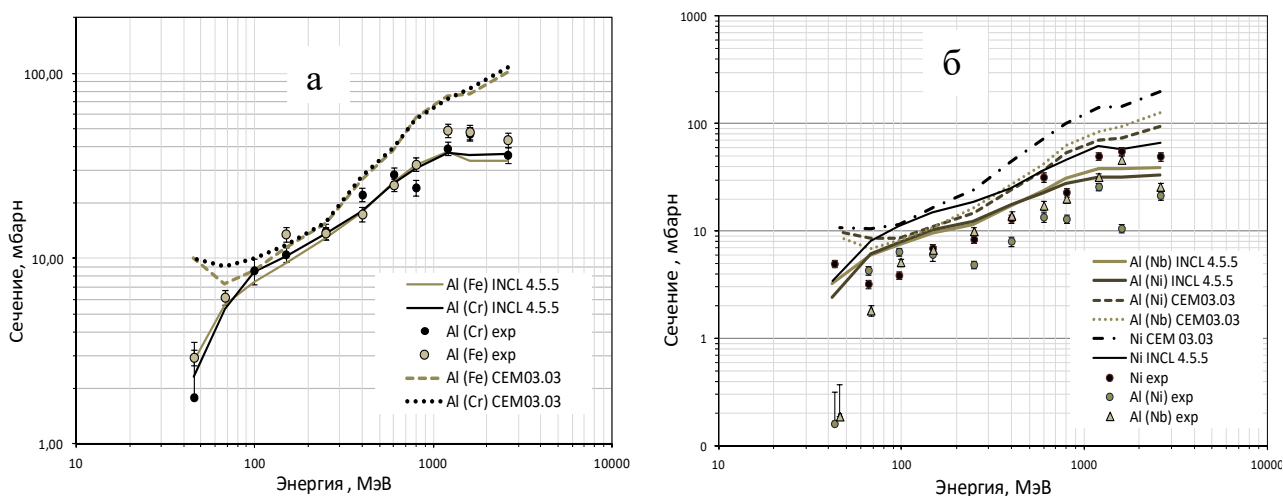


Рисунок 13 – Экспериментальные и расчетные интегральные сечения накопления ^3H в образцах в составе «сэндвичей» Fe-Al, Cr-Al (а) и Ni-Al, Nb-Al (б)

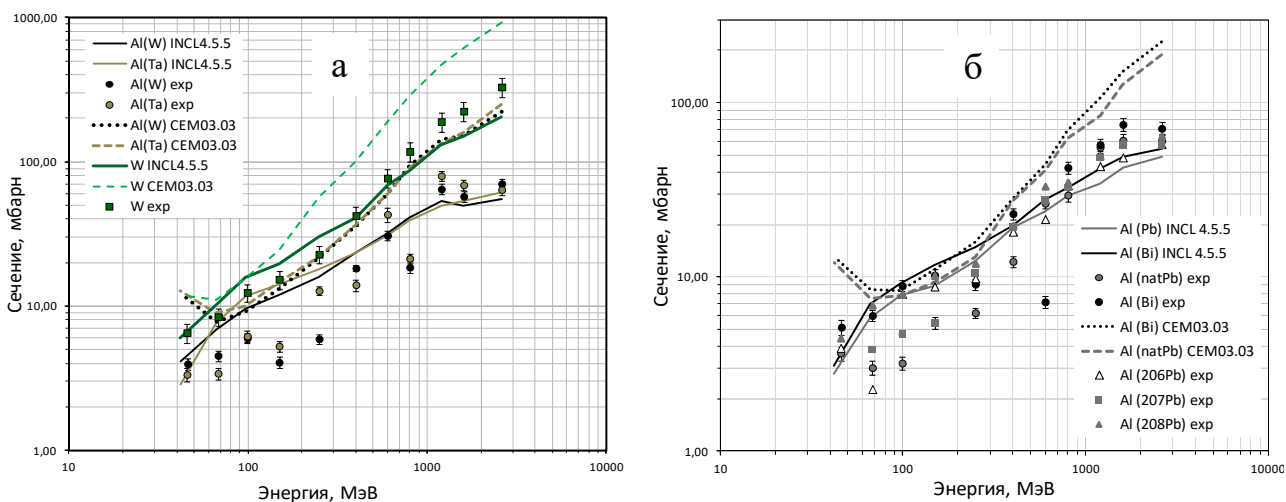


Рисунок 14 – Экспериментальные и расчетные интегральные сечения накопления ^3H в образцах в составе «сэндвичей» W-Al, Ta-Al (а) и Pb-Al, Bi-Al (б)

Факторы $\langle F \rangle$, \bar{F} и $\Delta\bar{F}$ для оценки согласия расчетов обеих моделей с экспериментальными данными приведены в таблице 4. Показано, что предсказательные способности моделей INCL4.5.5 и SEM03.03 достаточно близки. Модель INCL4.5.5 показывает несколько лучшие результаты, однако сделать однозначное заключение об ее превосходстве в условиях данного эксперимента не представляется возможным в связи с рядом допущений, принятых при расчетах интегральных сечений.

Таблица 4 – Значения статистических факторов для расчетных интегральных сечений накопления ${}^3\text{H}$ в диапазоне энергий протонов от 40 до 2600 МэВ

Образец	N	SEM03.03			INCL4.5.5		
		\bar{F}	$\Delta(\bar{F})$	$\langle F \rangle$	\bar{F}	$\Delta(\bar{F})$	$\langle F \rangle$
${}^{27}\text{Al}$	86	1,94	1,66	2,23	1,20	1,66	<u>1,62</u>
${}^{\text{nat}}\text{Ni}$	11	2,53	1,80	3,01	1,60	1,52	<u>1,88</u>
${}^{\text{nat}}\text{W}$	15	2,18	1,27	2,26	0,90	1,30	<u>1,33</u>

На рисунке 15 представлены полученные в работе независимые сечения образования ${}^3\text{H}$ в ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ni}$ и ${}^{\text{nat}}\text{W}$ вместе с результатами моделирования SEM03.03 и опубликованными ранее экспериментальными данными. Приведены факторы среднеквадратичного отклонения $\langle F \rangle$, характеризующие отношение расчетных и экспериментальных значений сечений, полученных различными исследовательскими группами – они имеют значительный разброс, не позволяющий сделать однозначный вывод о точности расчетов SEM03.03. Для более полной оценки предсказательной способности модели SEM03.03 в будущем требуется проведение дополнительных экспериментов по уточнению значений диффузионных и геометрических поправок на потери ${}^3\text{H}$ в формуле расчета скоростей реакций (2).

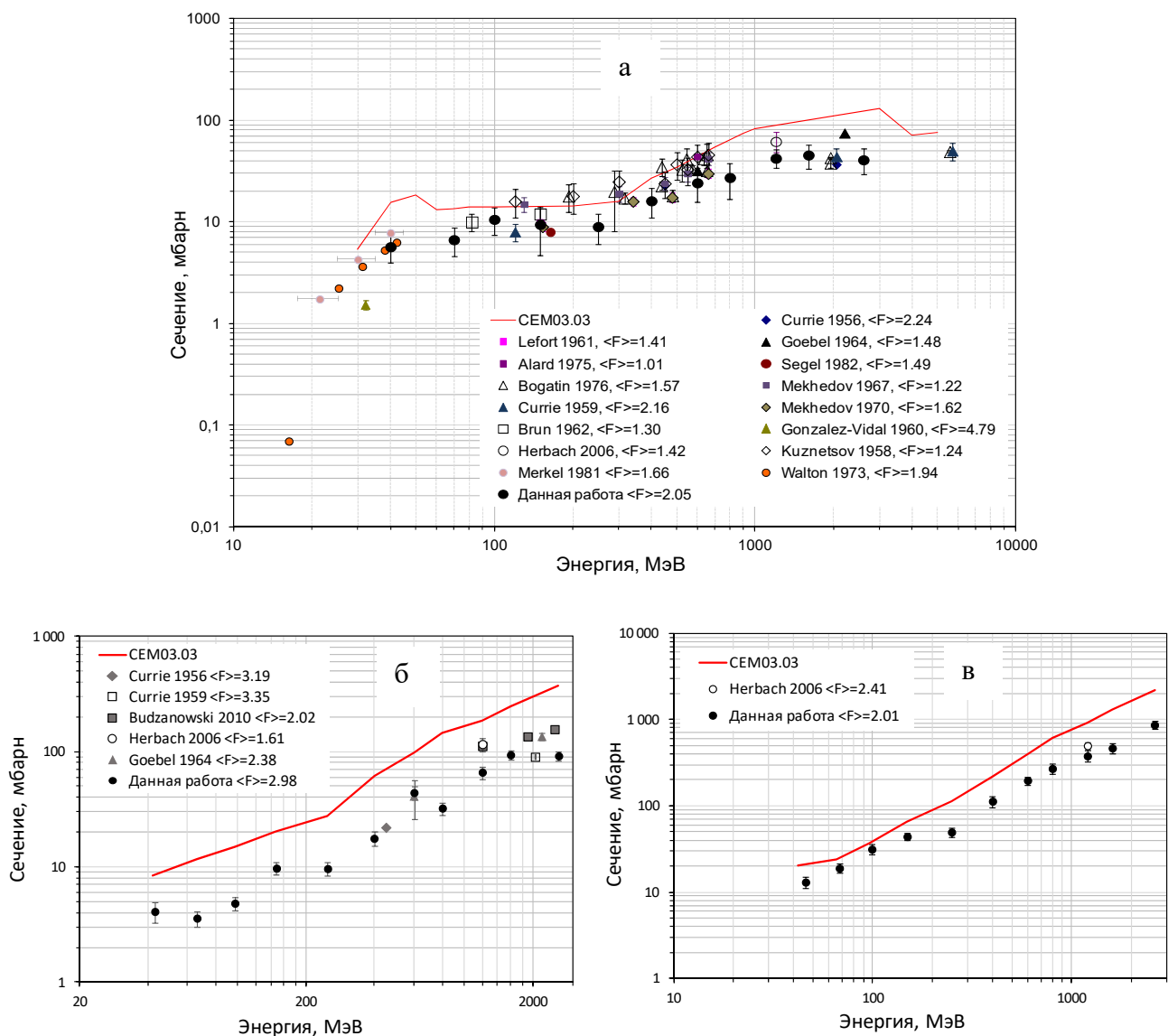


Рисунок 15 – Рассчитанные сечения и экспериментальные функции возбуждения для реакций $^{27}\text{Al}(p,x)^3\text{H}$ (а), $^{\text{nat}}\text{Ni}(p,x)^3\text{H}$ (б) и $^{\text{nat}}\text{W}(p,x)^3\text{H}$ (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в диссертации экспериментальные данные были получены в лаборатории фундаментальных ядерно-физических исследований НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ в период с 2014 по 2017 год.

По результатам выполненной работы сформулированы следующие основные результаты:

1) систематизированы имеющиеся к настоящему времени данные о сечениях образования долгоживущих продуктов (^{44}Ti , $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ и ^3H), образующихся при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с конструкционными материалами ЭЛЯУ (^{27}Al , $^{\text{nat}}\text{Cr}$, ^{56}Fe , $^{\text{nat}}\text{Ni}$, ^{93}Nb , $^{\text{nat}}\text{Ta}$ и $^{\text{nat}}\text{W}$);

2) получены кумулятивные сечения образования радионуклида ^{44}Ti в образцах из $^{\text{nat}}\text{Cr}$ (10 значений), ^{56}Fe (11 значений), $^{\text{nat}}\text{Ni}$ (9 значений) и ^{93}Nb (3 значения), облученных протонами 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. Для реакций $^{\text{nat}}\text{Cr}(p,x)^{44}\text{Ti}$ и $^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Ti}$ данные получены впервые. С использованием полученных данных дополнительно определены кумулятивные сечения образования ^{44}Sc ;

3) получены независимые сечения образования высокоспинового изомера $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ в образцах из $^{\text{nat}}\text{Ta}$ (11 значений) и $^{\text{nat}}\text{W}$ (8 значений), облученных протонами 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. Для тонких мишеней из $^{\text{nat}}\text{Ta}$ (толщиной менее 10 мг/см²) данные получены впервые;

4) разработана методика измерений сечений образования ^3H в облученных образцах. Проведено выделение ^3H из 144 образцов. Получены интегральные сечения накопления ^3H в образцах из ^{27}Al (118 значений), $^{\text{nat}}\text{Ni}$ (11 значений) и $^{\text{nat}}\text{W}$ (15 значений), облученных протонами 11-ти энергий в диапазоне от 40 до 2600 МэВ. Оценены потери ^3H из облученных образцов за время их хранения, которое составило от 5,9 до 13,6 года, и установлено, что эти потери составили не более $2,3 \cdot 10^{-4}$ %. Разработана программа, которая позволяет рассчитать поправочный коэффициент, учитывающий потери ^3H во время облучения, и определены независимые сечения образования ^3H в образцах из ^{27}Al , $^{\text{nat}}\text{Ni}$, $^{\text{nat}}\text{W}$, облученных протонами с энергиями от 40 до 2600 МэВ (33 значения);

5) сечения образования ^3H и ^{44}Ti промоделированы с применением различных версий моделей внутриядерного каскада в составе ВЭТ программ, предсказательная способность которых была оценена с использованием полученных экспериментальных данных. Установлено, что наилучшей предсказательной способностью обладают ядерные модели INCL4.5/INCL4.5.5 и SEM03.02/SEM03.03, однако даже эти модели не позволяют рассчитывать сечения с требуемой точностью: отклонение расчетных значений от экспериментальных практически во всех случаях составляет более 30%;

6) предложена методика расчета изомерных состояний, на основании которой была модифицирована каскадно-экситонная модель SEM03.03. Модифицированная модель SEM03.03-ext апробирована на различных экспериментальных данных: $^{208}\text{Pb}(p,x)^{202\text{m}}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{202(\text{m}+\text{g})}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{204\text{m}}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{204(\text{m}+\text{g})}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{198\text{m}}\text{Au}$, $^{208}\text{Pb}(p,x)^{198(\text{m}+\text{g})}\text{Au}$ и использована для расчета сечений образования $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ в $^{\text{nat}}\text{Ta}$ и $^{\text{nat}}\text{W}$. Результаты расчетов модели SEM03.03-ext для об-

разцов из ^{nat}Ta хорошо согласуются с экспериментальными данными для протонов с энергиями выше 200 МэВ (фактор $\langle F \rangle = 1,42$, отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет от 5 до 33%), ниже этой энергии наблюдается значительное расхождение (для отдельных значений сечений до 700%). Для образцов из ^{nat}W согласие экспериментальных данных с расчетами SEM03.03-ext существенно хуже (фактор $\langle F \rangle = 2,01$ энергии протонов выше 200 МэВ, отклонение расчетных значений от экспериментальных составляет от 23 до 300%).

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Все включенные в диссертацию результаты были получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка задач исследований, выбор методов их решения и интерпретация полученных результатов проводились при непосредственном участии автора совместно с соавторами публикаций.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Yu.E. Titarenko, V.F. Batyaev, K.V. Pavlov, A.Yu. Titarenko, V.M. Zhivun, **M.V. Chauzova**, S.A. Balyuk, P.V. Bebenin, A.V. Ignatyuk, S.G. Mashnik, S. Leray, A. Boudard, J.C. David, D. Mancusi, J. Cugnon, Y. Yariv, K. Nishihara, N. Matsuda, H. Kumawat, A.Yu. Stankovskiy. Excitation functions of the $^{nat}\text{Cr}(p,x)^{44}\text{Ti}$, $^{56}\text{Fe}(p,x)^{44}\text{Ti}$, $^{nat}\text{Ni}(p,x)^{44}\text{Ti}$ and $^{93}\text{Nb}(p,x)^{44}\text{Ti}$ reactions at energies up 0.4 to 2.6 GeV // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2016. Vol. 821. P. 136-141.

2. Yu.E. Titarenko, V.F. Batyaev, **M.V. Chauzova**, I.A. Kashirin, S.V. Malinovskiy, K.V. Pavlov, V.I. Rogov, A.Yu. Titarenko, V.M. Zhivun, S.G. Mashnik, A.Yu. Stankovskiy. Determination of integral cross sections of ^3H in Al foils monitors irradiated by protons with energies ranging from 40 to 2600 MeV // 12th International Conference on Nucleus-Nucleus Collision (NN2015). Catania, Italy, June 21-26, 2015. EPJ Web of Conferences. 2016. Vol. 117. 05009. P. 1-4.

3. Ю.Е. Титаренко, В.Ф. Батяев, С.В. Малиновский, К.В. Павлов, В.И. Рогов, А.Ю. Титаренко, **М.В. Чаузова**, В.М. Живун, П.Н. Алексеев, Я.И. Штромбах, А.Б. Сазонов, С.Г. Машник, А.Ю. Станковский, С. Лерэ, Ж.-К. Давид,

Д. Манкузи. Интегральные сечения образования ^3H в Al образцах, облученных протонами с энергиями от 40 до 2600 МэВ. Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами // IHISM'16 JUNIOR. Сборник докладов Одиннадцатой международной школы молодых ученых и специалистов им. А.А. Курдюмова/Под ред. д-ра техн. наук А. А. Юхимчука. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2017. С. 130-144.

4. Yu.E. Titarenko, K.V. Pavlov, A.Yu. Titarenko, **M.V. Chauzova**, V.M. Zhivun, A.V. Ignatyuk, S.G. Mashnik, A.Yu. Stankovsky, S.E. Chigrinov, K.K. Gudima. Measurements and analysis of $^{178\text{m}2}\text{Hf}$ production cross sections under $^{\text{nat}}\text{Ta}$ and $^{\text{nat}}\text{W}$ irradiation by protons with 0.04–2.6 GeV energies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2018. Vol. 880. P. 6-14.

5. Yu.E. Titarenko, K.V. Pavlov, S.V. Malinovskiy, A.Yu. Titarenko, **M.V. Chauzova**, V.I. Rogov, V.F. Batyaev, V.M. Zhivun, S.I. Tyutyunnikov, A.B. Sazonov, A.Yu. Stankovskiy, S. Leray, J.C. David, D. Mancusi. Tritium production in ADS structural materials // IX International Conference “Modern problems of Nuclear physics and Nuclear technologies”, Tashkent, Uzbekistan, September 24-27, 2019. Book of Abstracts. 2019. P. 113-115.