

**Федеральное Государственное Унитарное Предприятие
«Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики»**

На правах рукописи

Бутко Михаил Алексеевич

**Экспериментальное изучение данных
прямой и обратной кинематики
в тонких мишенях из ^{56}Fe и $^{\text{nat}}\text{Cr}$**

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 2010 г.

УДК 539.12 + 539.14

Работа выполнена в ФГУП «ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики», г. Москва.

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук Батяев В. Ф.
(ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ», г. Москва)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, Куликов В. В.
(ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ», г. Москва)

кандидат физ.-мат. наук, Блохин А. И.
(ГНЦ РФ ФЭИ, г. Обнинск)

Ведущая организация Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», г.Москва, Каширское ш., д 31.

Защита диссертации состоится “ 5 ” октября 2010 г. в “11” часов на заседании диссертационного совета Д 201.002.01 в конференц-зале «ГНЦ РФ ИТЭФ» по адресу: г. Москва, ул.Б. Черемушкинская, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ. Также диссертация и автореферат доступны по запросу через электронную почту Mikhail.Butko@itep.ru

Автореферат разослан “ 1 ” сентября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат.наук,

Васильев В.В.

Общая характеристика работы

В последние десятилетия, в связи с удорожанием стоимости углеводородного топлива наблюдается тенденция к ренессансу ядерной энергетики. При этом стратегия развития ядерной энергетики должна быть связана с решением проблем экологической безопасности, в первую очередь безопасного обращения отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов (РАО).

Рассматривается несколько концепций решения этой проблемы (захоронение в специальных хранилищах, использование быстрых реакторов и др.). Особое место среди них занимает так называемая электроядерная технология. В качестве её физической основы выступает использование подкритического blankets с интенсивным внешним источником нейтронов. Одним из вариантов такого источника может служить мишень из тяжелого материала, облучаемая протонным пучком сильноточного ускорителя. Подкритичность blankets такой установки позволит обеспечить ядерную безопасность реализации трансмутационных технологий, направленных в первую очередь на выжигание минорных актинидов, содержащихся в отработанном топливе.

Важнейшими исходными данными для конструктивных и эксплуатационных характеристик электроядерных установок (ЭЛЯУ), являются сечения радиоактивных продуктов реакций, образующихся при взаимодействии протонов с конструкционными материалами ускорителя и мишени.

Обилие конструкционных материалов и разнообразие возможных условий эксплуатации ЭЛЯУ (в том числе и по энергии пучка протонов) объективно вынуждает рассматривать в качестве базы для формирования константного обеспечения по протонным сечениям расчетные методы. Оно может быть создано при использовании существующих высокоэнергетических транспортных программ. Однако установленные серьезные расхождения между результатами расчетов по различным программам требуют проводить непрерывную работу по их верификации и совершенствованию, для чего необходимы опорные значения сечений, полученные экспериментальным путем.

Экспериментальное определение сечений образования радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с важнейшими конструкционными материалами ЭЛЯУ является предметом исследования настоящей диссертации, чем, принимая во внимание

сказанное, определяется ее **актуальность**.

Цель диссертационной работы состоит в создании наборов экспериментальных значений сечений образования радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов промежуточных и высоких энергий с ядрами элементов, перспективных для использования в качестве основных конструктивных материалов ЭЛЯУ.

Основные задачи диссертационной работы

- 1) сбор и анализ имеющейся экспериментальной информации по протонным сечениям;
- 2) обоснование метода исследований, энергий налетающих протонов;
- 3) определение материалов, подлежащих экспериментальному исследованию в первоочередном порядке;
- 4) формирование аппаратно-методического и информационного обеспечения эксперимента и его адаптация к условиям облучения на протонном синхротроне У-10 ИТЭФ;
- 5) проведение облучений образцов, физических измерений и обработки их результатов;
- 6) оценка сечений мониторных реакций;
- 7) сравнение экспериментальных значений сечений радиоактивных продуктов реакций, где это возможно, с опубликованными ранее результатами;
- 8) сравнение экспериментальных значений сечений радиоактивных продуктов реакций с соответствующими расчетными данными и качественная оценка отмеченных расхождений.

Методы исследований

В диссертационной работе используются следующие основные методические приемы:

- 1) γ -спектрометрия облученных протонами образцов исследуемых материалов без предварительной химической сепарации;
- 2) сопоставление полученных результатов с имеющимися экспериментальными и расчетными данными.

Научная новизна

Получено 831 значение сечений, из которых впервые определено 107 значений сечений образования продуктов реакций (или 14 функций возбуждения)

для ^{nat}Cr и 60 значений для ^{56}Fe (в других, ранее неизученных диапазонах энергии).

На защиту выносятся:

- 1) методика и результаты измерений сечений образования радиоактивных продуктов реакций при взаимодействии протонов с: ^{56}Fe при энергии 0.04, 0.07, 0.1, 0.15, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.6 и 2.6 ГэВ и ^{nat}Cr при энергии 0.04, 0.07, 0.1, 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 и 2.6 ГэВ;
- 2) методика и результаты экспериментального определения поправок для учета нестационарности потока протонов;
- 3) результаты сравнения значений сечений ^{56}Fe с результатами прямой (ИТЭФ) и обратной (GSI) кинематики и другой имеющейся экспериментальной информацией;
- 4) результаты моделирования экспериментальных данных с использованием 19 моделей в составе высокоэнергетических транспортных программ и определение их предсказательной способности;
- 5) анализ сравнения экспериментальных и расчетных функций возбуждения.

Практическое значение работы:

- 1) Возможность использования результатов в качестве самостоятельных ядерных данных, характеризующих взаимодействие протонов в промежуточной области энергий с различными элементами;
- 2) возможность использования полученных данных для верификации и совершенствования расчетных программ, используемых при создании и эксплуатации ЭЛЯУ;
- 3) дополнение мировых баз данных по протонным сечениям.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения (общих выводов по диссертации) и приложения, состоящего из двух частей, касающихся значений скоростей реакций и радиоактивных цепочек образования кумулятивных продуктов реакций, оформленного отдельным томом; имеет объем 115 страниц печатного текста; содержит 30 рисунков, 21 таблицу и библиографию (162 названия).

Краткое содержание работы

Во **Введении** обсуждается концепция уничтожения радиоактивных отходов (РАО) с использованием ЭЛЯУ.

В **Главе 1** диссертации приведен обзор возможных конструкций мишеных устройств ЭЛЯУ. Обоснован выбор исследуемых материалов. Приведены результаты информационного анализа имеющихся баз ядерных данных по сечениям взаимодействия протонов с ядрами выбранных материалов. Обосновано использование метода полупроводниковой γ -спектрометрии облученных образцов без предварительной химической сепарации в качестве основного способа исследований. В рамках предварительного планирования эксперимента анализируются возможности проведения сравнения получаемых данных с имеющейся экспериментальной информацией, полученной при помощи различных методик, для общей оценки их достоверности.

В **Главе 2** описана методика определения значений выходов радиоактивных продуктов реакций и их погрешностей по результатам анализа первичной экспериментальной информации, а также результаты измерений и анализа некоторых мониторинговых сечений.

Измерения выполнялись относительным методом, с использованием γ -спектрометра на базе IBM PC с двумя Ge-детекторами (разрешение 1.8 и 1.7 кэВ для γ -линии 1332 кэВ ^{60}Co); в качестве мониторинговой использовалась реакция $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$. Получены формулы, определяющие скорости ядерных реакций в образцах, для одно-двухзвенной цепочки «генетически» связанных радионуклидов при импульсном облучении экспериментальных образцов протонами с амплитудной нестационарностью их структуры:

$$R_1^{cum/ind} = \frac{\hat{A}_1}{N_{Tag} \cdot h_1 \cdot e_1} \cdot \frac{1}{F_1}, \quad (1)$$

$$R_1^{cum/ind} = \frac{\hat{A}_2^1}{N_{Tag} \cdot h_2 \cdot e_2 \cdot n_{12}} \cdot \frac{I_2 - I_1}{I_2} \cdot \frac{1}{F_1}, \quad (2)$$

$$R_2^{ind} = \left(\frac{\hat{A}_2^2}{F_2} + \frac{\hat{A}_2^1}{F_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} \right) \cdot \frac{1}{N_{Tag} \cdot h_2 \cdot e_2}, \quad (3)$$

$$R_2^{cum} = R_2^{ind} + n_{12} \cdot R_1^{cum/ind} = \left(\frac{\hat{A}_2^1}{F_1} + \frac{\hat{A}_2^2}{F_2} \right) \cdot \frac{1}{N_{Tag} \cdot h_2 \cdot e_2}, \quad (4)$$

где $\hat{A}_1 = A_1 \cdot k_{m_1}$, $\hat{A}_2^1 = A_2^1 \cdot k_{m_2}$, $\hat{A}_2^2 = A_2^2 \cdot k_{m_2}$ – параметры, определяемые путем фитирования экспериментальных точек кривых распада «материнского» и «дочерного» ядер методом наименьших квадратов («материнский нуклид – индекс 1», «дочерний нуклид – индекс 2»); N_{Tag} – число ядер в облучаемом образце; η_1, η_2 – абсолютные выходы γ -квантов; λ_1, λ_2 – постоянные распада; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – абсолютная эффективность спектрометра при энергиях γ -квантов E_1 (I нуклид) и E_2 (II нуклид); ν – коэффициент ветвления, т.е. вероятность перехода материнского нуклида в дочерний.

Поправки k_{μ} , учитывающие поглощение γ -квантов в материале экспериментального образца, определяются из выражений

$$k_{m_j} = \frac{k \cdot S_{tot_j} \cdot h}{1 - e^{-k \cdot S_{tot_j} \cdot h}}, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta k_{m_j}}{k_{m_j}} = \left(1 - k_{m_j} \cdot e^{-k \cdot S_{tot_j} \cdot h} \right) \cdot \frac{\Delta S_{tot_j}}{S_{tot_j}}, \quad (6)$$

где h – толщина экспериментального образца ($\Gamma/\text{см}^2$); S_{tot_j} – полное сечение взаимодействия γ -квантов j -ой энергии с веществом (барн/атом), $k = \frac{N_{A_v}}{M} \cdot 10^{-24}$ – коэффициент перехода от размерности [барн/атом] к размерности [$\text{см}^2/\Gamma$], в котором N_{A_v} – число Авогадро, M – молекулярный вес.

Поправки, учитывающие амплитудную нестационарность структуры пучка, имеют вид

$$z_i = \frac{1 - e^{-I_i t_{irr}}}{I_i \cdot T \cdot \sum_{j=1}^k x_i \cdot e^{-I_i \cdot (k-j) \cdot T}} = \frac{1 - e^{-I_i t_{irr}}}{I_i \cdot t_{irr} \cdot \sum_{j=1}^k \Phi_j \cdot e^{-I_i t_j}} \cdot \sum_{j=1}^k \Phi_j. \quad (7)$$

Плотность потока протонов и его погрешность определяются из выражений

$$\hat{\Phi}_{st} = \frac{R_{st}^{cum/ind}}{S_{st}^{cum/ind}}, \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \hat{\Phi}_{st}}{\hat{\Phi}_{st}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{st}^{cum/ind}}{R_{st}^{cum/ind}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{st}^{cum/ind}}{S_{st}^{cum/ind}}\right)^2}. \quad (8)$$

где $R_i^{cum/ind}$ – скорость образования продукта реакции в образце; $S_i^{cum/ind}$ – кумулятивное или независимое сечения образования нуклидов в экспериментальном образце; $\hat{\Phi}_{st}$ – средняя плотность потока протонов.

Определив с использованием формул (1)-(4) скорости ядерных реакций в облученных образцах и с использованием формулы (7) – плотность потока протонов, при которой облучался образец, требуемое сечение образования данного продукта реакции и его погрешность вычисляются из выражений

$$S_i^{cum/ind} = \frac{R_i^{cum/ind}}{\hat{\Phi}_{st}} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta S_i^{cum/ind}}{S_i^{cum/ind}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_i^{cum/ind}}{R_i^{cum/ind}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \hat{\Phi}_{st}}{\hat{\Phi}_{st}}\right)^2} \quad (10)$$

Как показывает анализ, основной вклад в полную погрешность вносят неопределенности значений ядерных данных – абсолютных квантовых выходов и сечений мониторинговых реакций, а также неопределенность эффективности регистрации спектрометра.

Используемые значения сечений мониторинговых реакций представлены в табл. 1, которые были определены на основании функции возбуждения реакции, представленной на рис. 1.

Глава 3 посвящена описанию техники эксперимента. Описывается ускоритель У-10 ИТЭФ и приводятся технические характеристики канала быстрого вывода протонов, который использовался для облучения образцов (рис.2). Расчет значений энергий протонных пучков при облучении «сэндвича» экспериментальный образец - монитор с учетом ионизационных потерь на конструктивных элементах транспортного канала и значения мониторинговой реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ при вычисленных энергиях приведены в Табл. 1. Расположение образцов и мониторов, закрепленных в центре алюминиевой пластине с размерами 72x72 мм и толщиной 0.1 мм, которая при облучении устанавливалась перпендикулярно пучку протонов показан на рис. 3а. На Рис. 3б приведена

схема облучения образцов вместе с мониторами, но зафиксированных не в полиэтиленовом пакете, а в алюминиевой обечайке.

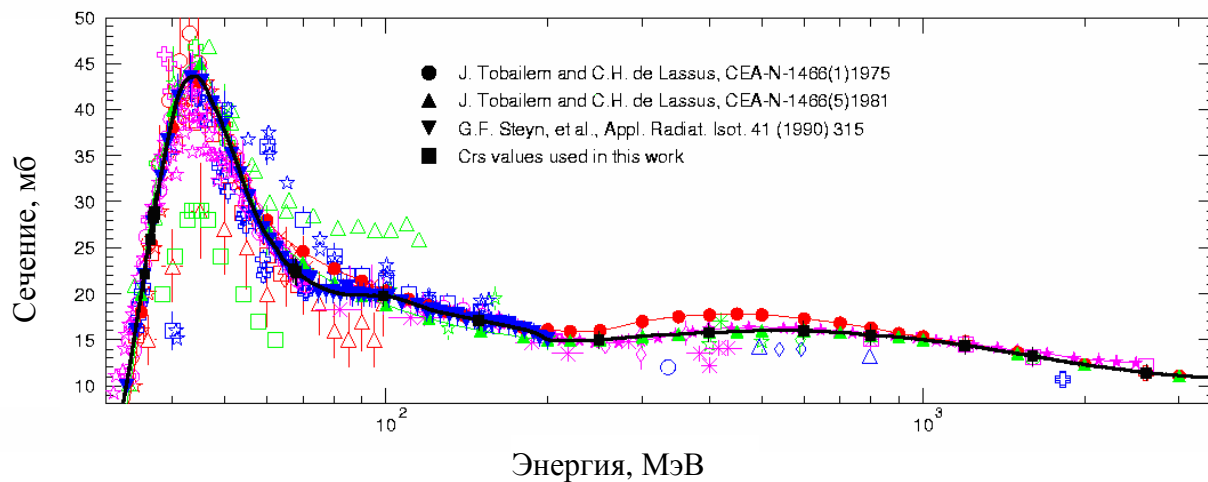


Рис. 1. Функция возбуждения реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$

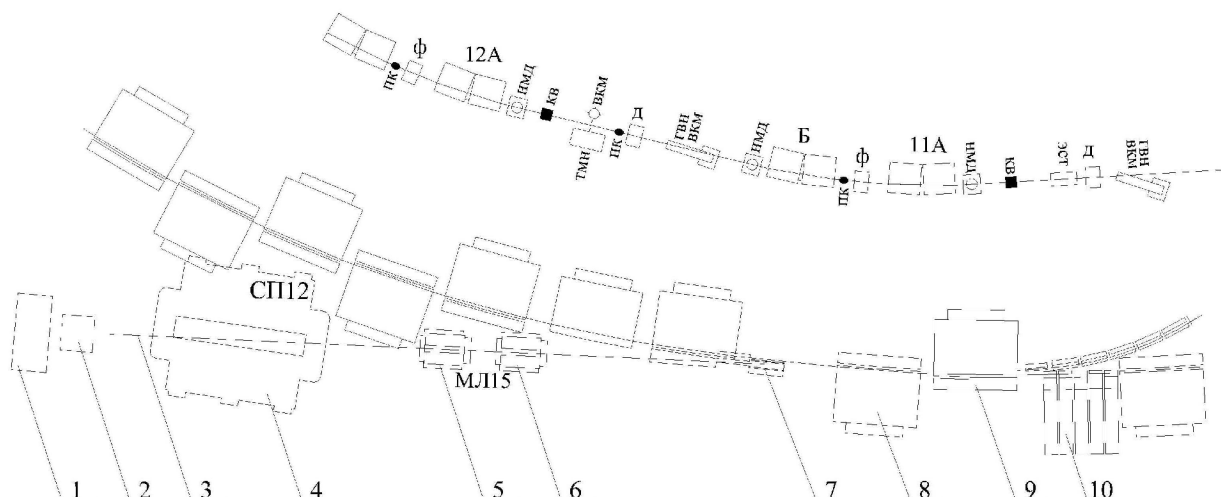


Рис. 2. Схема транспортного канала и элементы быстрого вывода протонного пучка.

Обозначения: 1 – подставка для размещения юстировочного столика и облучаемой мишени; 2 – токовый трансформатор; 3 – выходной фланец вакуумного протонопровода; 4 – поворотный магнит; 5 и 6 – дуплет квадрупольных линз, обеспечивающие фокусировку пучка; 7 – септум магнит; 8 и 9 – магнитные блоки ускоряющего кольца. 10 – кикер магнит с углом отклонения 15 мрад; 11 – корректирующий магнит (с углом отклонения 20-30 мрад)

Изменение схемы облучения обусловлено обнаруженным дополнительным вкладом при низких энергиях в значение сечения образования ^7Be , который образуется в полиэтилене за счет реакции $^{12}\text{C}(p,x)^7\text{Be}$ (рис. 4а). Поэтому для

четырёх энергий (40, 70, 100 и 150 МэВ) были выполнены дополнительные облучения образцов с целью определения сечений образования ^7Be при низких энергиях протонов (рис.4б).

Для выполнения экспериментов были определены рабочие характеристики спектрометров и проведены калибровки их эффективности регистрации γ -квантов в интервале энергий от 90 до 2614 кэВ и диапазоне расстояний источник-детектор от 40 до 1325 мм (рис.5). Предельная загрузка каждого спектрометрического тракта не превышала 5%. Пример измеренного γ -спектра приведен на рис. 6.

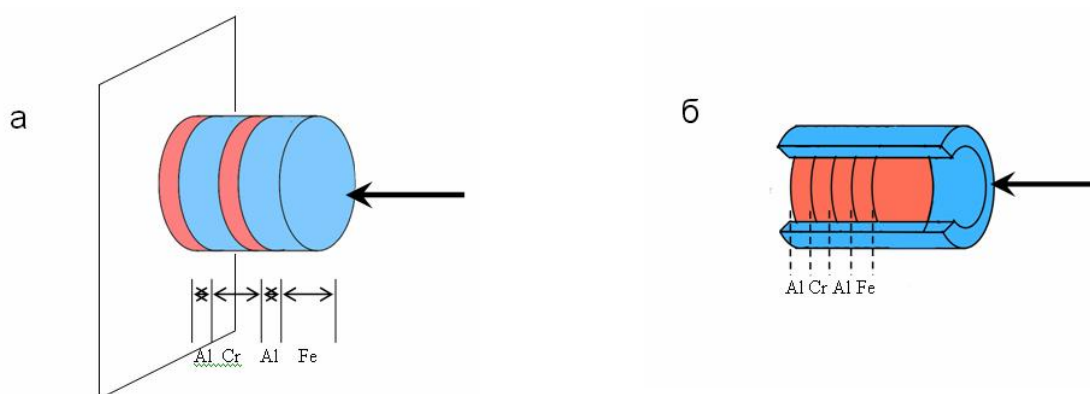


Рис. 3. Расположение мониторов и образцов при облучении

Описаны программное (SIGMA) и константное (PCNUDAT) обеспечения эксперимента, организация процессов измерений и обработки первичных экспериментальных результатов (GENIE2000). При идентификации радиоактивных продуктов реакции в ходе анализа измеренных γ -спектров использовалось три этапа:

- 1) на первом – исключались γ -линии короткоживущих нуклидов (с периодом полураспада менее 5 минут), а γ -линии оставшихся, в соответствии с базой PCNUDAT, в пределах разрешающей способности спектрометра объединялись в один массив (высокая разрешающая способность спектрометра существенно сокращает число γ -линии, входящих в него);
- 2) на втором – с использованием программы SIGMA определялось значение периода полураспада, для этой γ -линии на основании всех последовательно измеренных спектров, и сравнивалось с соответствующими значениями базы

ядерных данных PCNUDAT;

3) на третьем – идентифицированный по энергии и периоду радионуклид анализировался на наличие и других γ -линий, в соответствии с базой ядерных данных PCNUDAT;

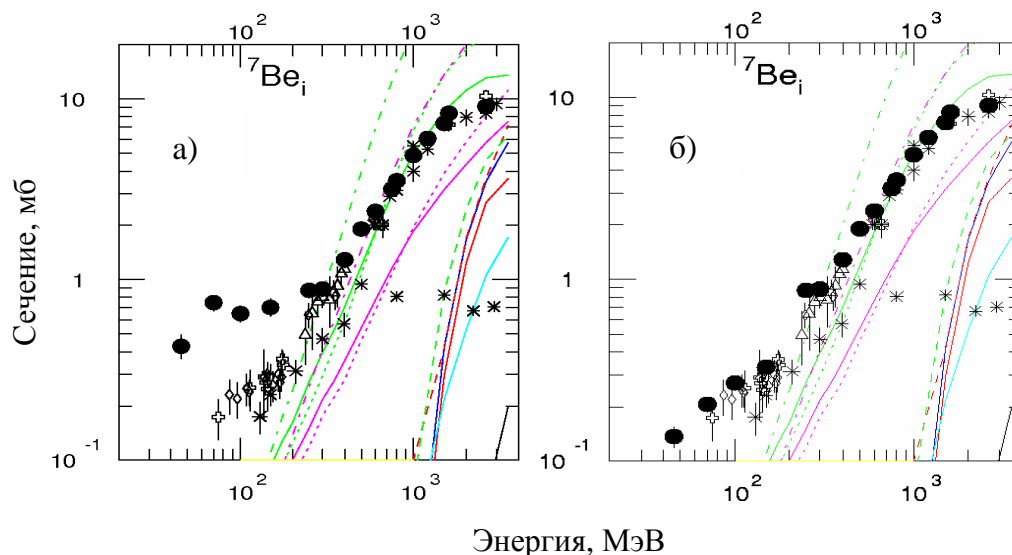


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные сечения измеренной $^{56}\text{Fe}(p,x)^7\text{Be}$ реакции. а) облучение образца в полиэтиленовом пакете, б) облучение образца без пакета

На рис. 7 представлены примеры распадных кривых продуктов реакций в ^{56}Fe , которые, в соответствии с формулами (1-4), использовались для определения независимых и кумулятивных скоростей реакций материнских и дочерних ядер.

В Главе 4 приведены результаты определения выходов радиоактивных продуктов реакций для исследуемых в настоящей работе протонных реакций. В проведенных экспериментах было определено 831 (см. табл. 14) значение сечения образования радиоактивных продуктов реакций, из них 224 значения независимых (обозначение- (i)), 71 значение суммы выходов независимых метастабильного и основного состояния ($i(\Sigma m_j + g)$), 74 значения независимых выходов метастабильного состояния ($i(\Sigma m_j)$), 462 значений кумулятивных и супракумулятивных выходов (с, с*). Количество полученных сечений каждого типа по всем энергиям подробно представлено в табл. 2.

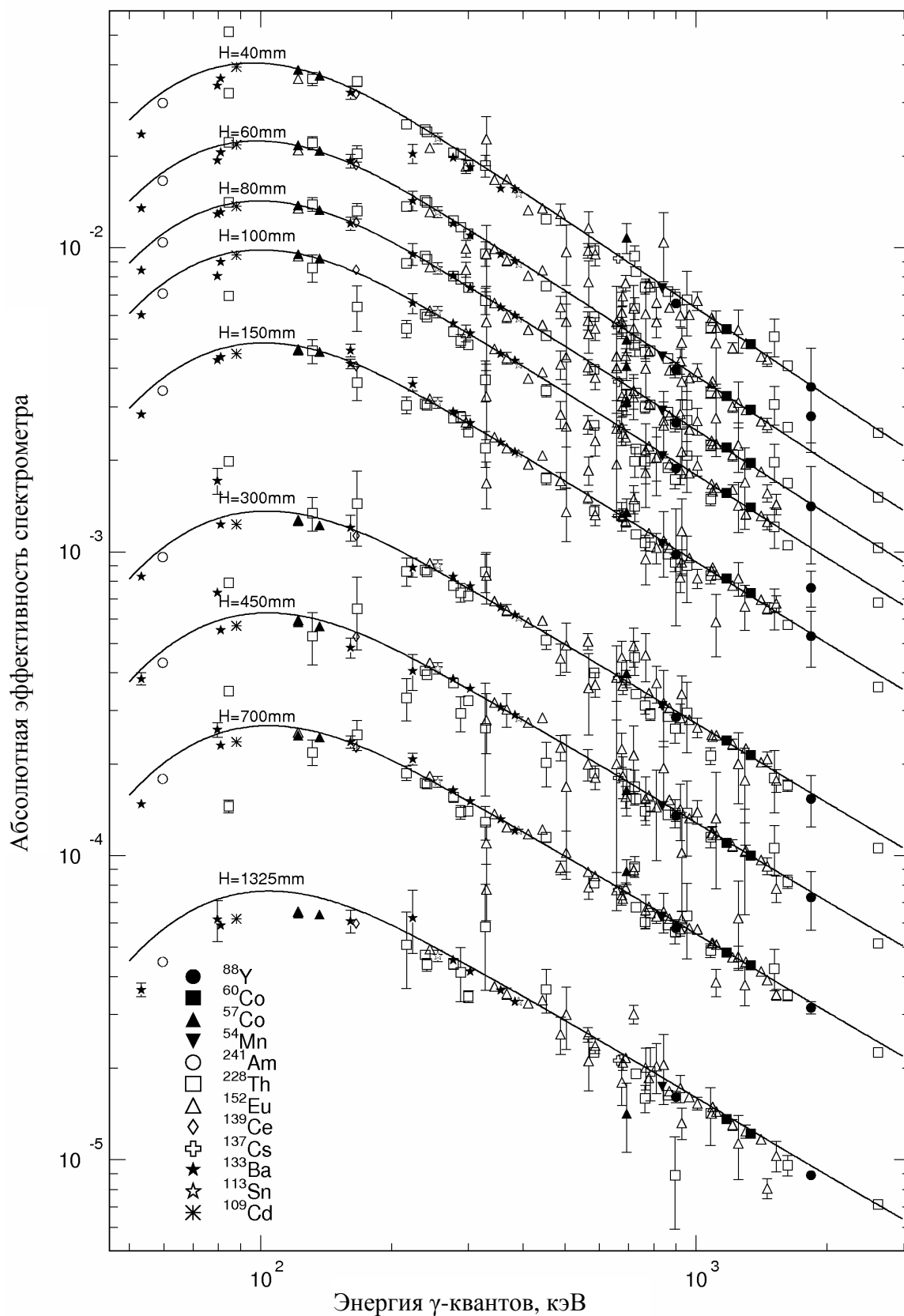


Рис. 5 Абсолютная эффективность регистрации спектрометра

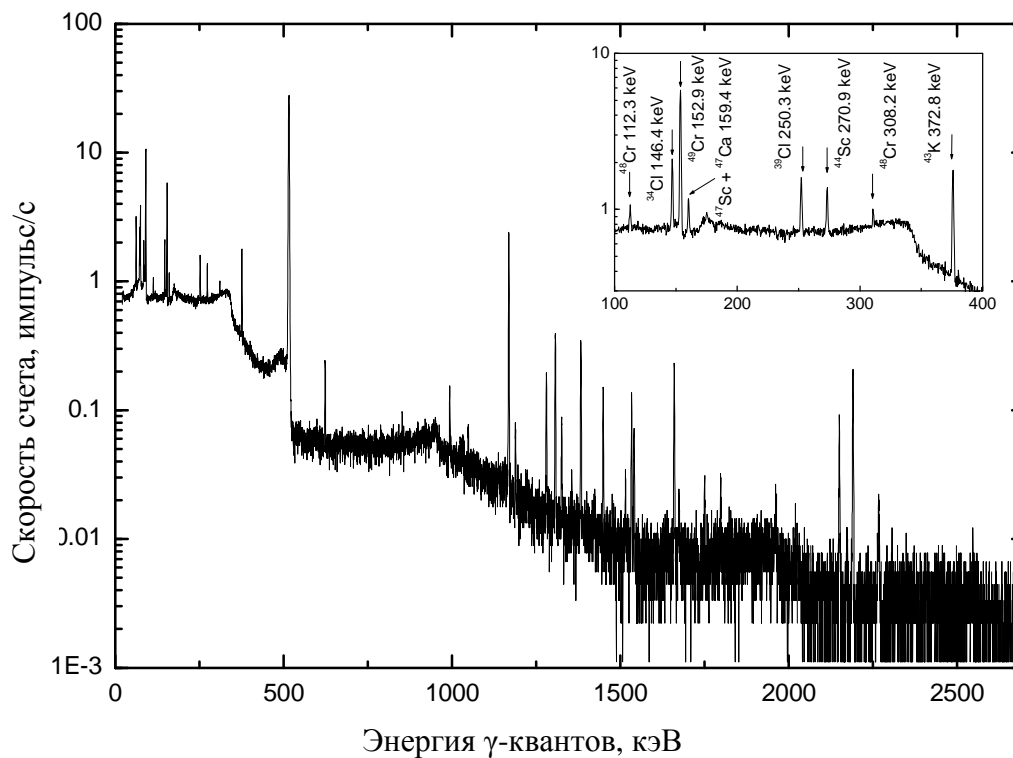


Рис. 6. Пример γ -спектра ^{nat}Cr #05 $E_p=260\text{MeV}$. Время высвечивания 1.49 ч после облучения. Продолжительность измерения: 900 с

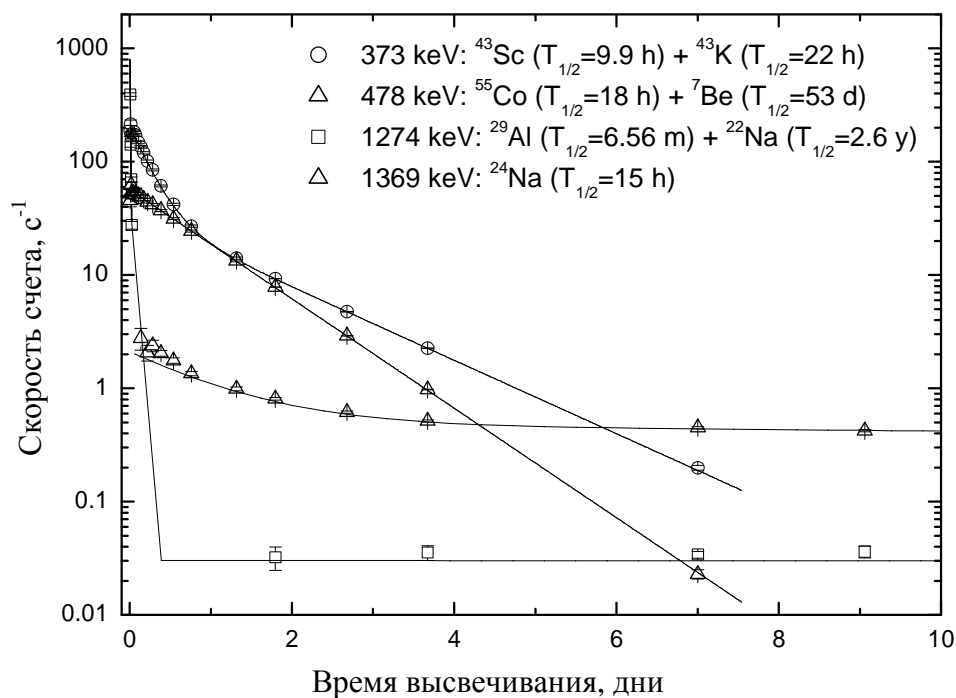


Рис. 7. Примеры распадных кривых продуктов реакции в ^{56}Fe , облученном с энергией 2600 МэВ

Т а б л и ц а 1. Значения энергий протонных пучков при облучении "сэндвича" экспериментальный образец - монитор с учетом ионизационных потерь на конструкционных элементах транспортного канала и значения мониторинговой реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ при вычисленных энергиях.

Энергия (ГэВ)	Обр-1 Обр-2	Частота, МГц	E0, МэВ	Мембр Fe (мм)	Толщ возд (мм)	dE мембр (МэВ)	dE возд (МэВ)	dE поллет 110мк	dE в Обр-1 (МэВ)	dE в Мон-1 (МэВ)	dE поллет 210мк	dE в Обр-2 (МэВ)	dE в Мон-2 (МэВ)	dE-tot Обр-1	dE-tot Мон-1	E-res Обр-1	E-res Мон-1	dE-tot Обр-2	dE-tot Мон-2	E-res Обр-2	E-res Мон-2	^{22}Na Mon1	^{22}Na Err Mon1	^{22}Na Mon2	^{22}Na Err Mon2
0.04	Fe-Cr	1.471	48.00	0.1	185	0.69	0.26	0.14	2.53	0.59	0.30	3.74	0.65	2.36	3.92	45.6	44.1	6.39	8.58	41.6	39.4	43.6	2.6	37.2	2.2
0.04	Fe-Cr (Be)*	1.471	48.00	0.1	185	0.69	0.26	0.14	4.29	0.61	0.30	4.20	0.69	3.24	5.69	44.8	42.3	8.40	10.85	39.6	37.2	43.1	2.6	29.7	1.8
0.07	Fe-Cr	1.747	69.95	0.1	185	0.52	0.19	0.10	1.87	0.22	0.21	2.64	0.45	1.75	2.79	68	67.2	4.43	5.98	66	64.0	22.6	1.4	23.9	1.4
0.07	Fe-Cr (Be)*	1.747	69.95	0.1	185	0.52	0.19	0.10	3.72	0.44	0.21	2.55	0.45	2.67	4.75	67	65.2	6.46	7.96	63	62.0	23.3	1.4	25.1	1.5
0.1	Fe-Cr	2.044	100.01	0.1	185	0.40	0.14	0.08	1.16	0.33	0.16	2.02	0.33	1.21	1.95	99	98	3.28	4.45	97	96	19.8	1.3	19.8	1.3
0.1	Fe-Cr (Be)*	2.044	100.01	0.1	185	0.40	0.14	0.08	1.55	0.32	0.16	1.57	0.33	1.40	2.33	99	98	3.43	4.39	97	96	19.8	1.3	19.8	1.3
0.15	Fe-Cr	2.4187	150.06	0.1	185	0.30	0.11	0.06	0.70	0.25	0.11	1.50	0.25	0.82	1.29	149	149	2.28	3.15	148	147	17.1	1.1	17.2	1.2
0.15	Fe-Cr (Be)*	2.4187	150.06	0.1	185	0.30	0.11	0.06	1.29	0.25	0.11	1.27	0.24	1.12	1.89	149	148	2.76	3.51	147	147	17.1	1.1	1.7	1.2
0.25	Fe-Cr	2.929	250.01	0.1	185	0.22	0.08	0.04	0.62	0.17	0.08	0.85	0.18	0.65	1.04	249	249	1.63	2.15	248	248	15,0		0,9	
0.4	Fe-Cr	3.404	400.14	0.1	185	0.17	0.06	0.03	0.58	0.13	0.06	0.69	0.13	0.55	0.91	400	399	1.38	1.79	399	398	15,8		1,0	
0.6	Fe-Cr	3.783	600.30	0.1	185	0.15	0.05	0.03	0.47	0.14	0.05	0.64	0.14	0.46	0.76	600	600	1.20	1.59	599	599	16,0		1,0	
0.8	Fe-Cr	4.018	799.75	0.1	185	0.13	0.05	0.03	0.43	0.13	0.05	0.59	0.13	0.42	0.70	799	799	1.11	1.47	799	798	15,5		1,1	
1.2	Fe-Cr	4.289	1199.51	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.44	0.12	0.04	0.61	0.12	0.41	0.69	1199	1199	1.10	1.46	1198	1198	14,4		1,0	
1.6	Cr	4.435	1599.17	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.59	0.11	0.04	0.00	0.00	0.48	0.83	1599	1598	0.93	0.93	1598	1598	13,2		1,0	
1.6	Fe	4.435	1599.17	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.43	0.11	0.04	0.00	0.00	0.40	0.67	1599	1598	0.77	0.77	1598	1598				
2.6	Cr	4.603	2605.82	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.59	0.11	0.04	0.00	0.00	0.48	0.83	2605	2605	0.92	0.92	2605	2605	11,4		0,9	
2.6	Fe	4.603	2605.82	0.1	185	0.12	0.04	0.02	0.39	0.11	0.04	0.00	0.00	0.38	0.63	2605	2605	0.73	0.73	2605	2605				

В Главе 5 приведены результаты экспериментов, выполненных в GSI (Gesellschaft f. Schwerionenforschung mbH) и сравнение результатов ИТЭФ и GSI.

В экспериментах, выполненных в GSI, мишень из жидкого водорода облучалась ионами ^{56}Fe с энергиями 0.3, 0.5, 0.75, 1.0 и 1.5 ГэВ/А (так называемая обратная кинематика – $^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^1_1\text{H}$).

Т а б л и ц а 2. Общее количество измеренных выходов радиоактивных продуктов реакций различных типов по каждому эксперименту

Нуклид	Энергия, ГэВ	Тип выхода				Всего
		i	c	i(Σm_i)	i($\Sigma m_i + g$)	
^{56}Fe	0.04	6	9	2	2	19
	0.07	7	10	2	2	21
	0.1	8	12	2	2	24
	0.15	8	13	2	2	25
	0.25	10	18	3	2	33
	0.3	9	19	3	2	33
	0.4	9	21	3	3	36
	0.5	9	19	3	2	33
	0.6	10	22	3	3	38
	0.75	9	23	3	3	38
	0.8	10	22	3	3	38
	1.0	9	23	3	3	38
	1.2	10	23	3	3	39
	1.5	9	23	3	3	38
	1.6	10	22	3	3	38
2.6	10	22	3	3	38	
$^{\text{nat}}\text{Cr}$	0.04	5	6	2	2	15
	0.07	6	7	2	2	17
	0.1	6	9	2	2	19
	0.15	8	11	3	3	25
	0.25	8	14	3	3	28
	0.4	8	19	3	3	33
	0.6	8	19	3	3	33
	0.8	8	19	3	3	33
	1.2	8	19	3	3	33
	1.6	8	19	3	3	33
	2.6	8	19	3	3	33
ВСЕГО		224	462	74	71	831

Сечения образования σ_{prod} рассчитывались в соответствии с выражением

$$s_{\text{prod}} = \frac{N}{n_t \cdot N_p} \cdot f_t \cdot f_e \cdot f_{\text{tr}} \cdot f_q \cdot f_{\text{tar}} \cdot f_{\text{sec}}, \quad (11)$$

где N – измеренная скорость счета, N_p – интенсивность ионного пучка, n_t – число атомов водорода в единице площади, f_t – измеренное мертвое время системы сбора данных, f_e – эффективность системы обнаружения, f_{tr} – потеря фрагментов из-за передачи к фрагмент-сепаратору, f_q – потеря фрагментов из-за неполного «обдирания» ионов, f_{tar} – влияние ослабления пучка и вторичных реакций в жидко-водородной мишени и f_{sec} – в других слоях вещества внутри фрагмент-сепаратора.

Особо следует отметить, что все продукты реакций, регистрируемые по этой методике, – независимые. На рис. 8 приведены некоторые экспериментальные данные, полученные в ИТЭФ и GSI.

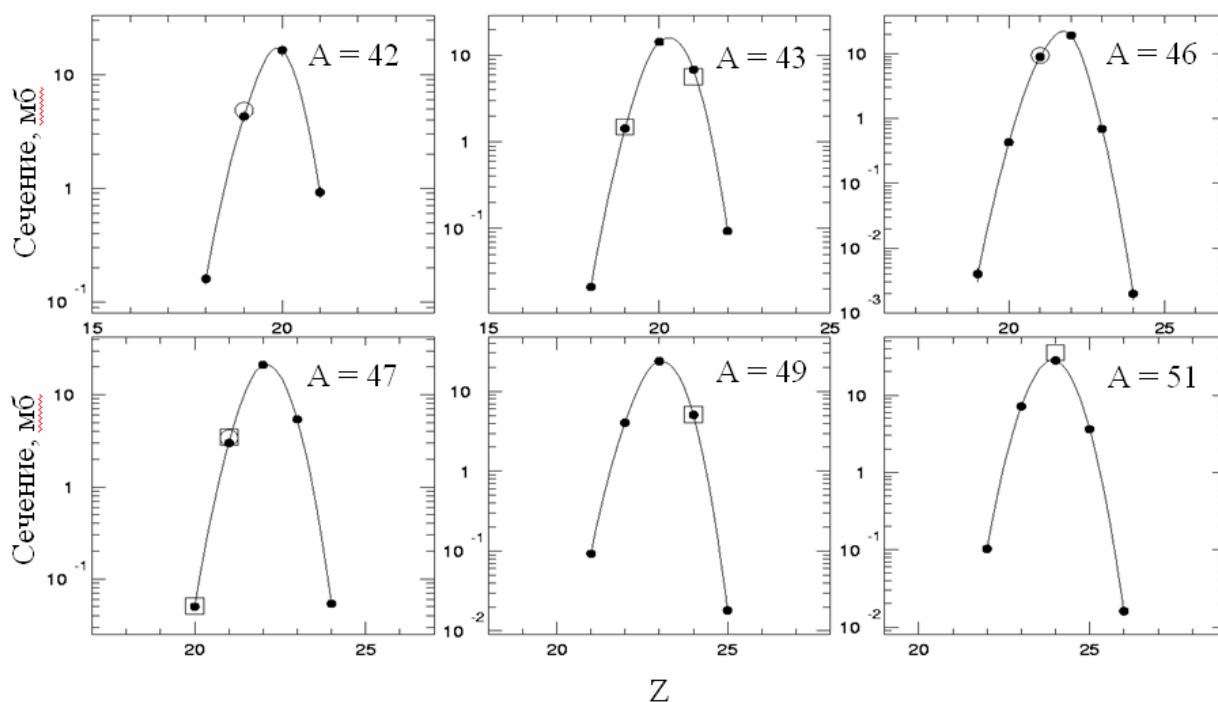


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных, полученных методами прямой и обратной кинематики. \square – ИТЭФ (кумулятивные сечения образования), \circ – ИТЭФ (независимые сечения образования), \bullet – GSI

Всего в GSI было получено 717 независимых значений сечений продуктов реакций, а в ИТЭФ при тех же энергиях – 180, из них 69 независимых. Для увеличения статистической достоверности сравнения независимые значения

GSI были свернуты в кумулятивные. Формулы для вычисления кумулятивных выходов имеют вид

$$S_k^{cum} = \sum_{j=1}^k m_{kj} \cdot S_j^{ind}, \quad k=1,2,\dots,n, \quad (12)$$

где m_{kj} – матрица, элементы которой вычисляются по формуле

$$m_{kj} = \begin{cases} \sum_{i=j}^k v_{ik} \cdot m_{ik}, & \text{для } k > j \\ 1, & \text{для } k = j \\ 0, & \text{для } k < j \end{cases}, \quad (13)$$

где v_{ik} – коэффициенты ветвления, т.е. вероятность перехода i -го нуклида в k -тый.

Для количественной оценки сходимости данных, полученных в ИТЭФ и GSI, использовался среднеквадратичный фактор отклонения $\langle F \rangle$, (14):

$$\langle F \rangle = 10 \sqrt{\left\langle \left(\lg \frac{S_i^{exp}}{S_i^{calc}} \right)^2 \right\rangle} \quad (14)$$

где S_i^{exp} – набор экспериментальных значений, полученных в ИТЭФ, S_i^{calc} – набор экспериментальных, полученных в GSI, или теоретических, полученных в результате моделирования, значений.

Результаты вычислений представлены в табл. 3. Результаты сравнения экспериментальных данных, полученных в ИТЭФ и GSI, демонстрируют совпадение в пределах ~30%, что позволяет сделать вывод о достаточной точности полученных разных групп данных и возможности их использования для верификации существующих ядерных моделей и кодов.

Т а б л и ц а 3. Среднеквадратичный фактор отклонения $\langle F \rangle$ данных, полученных в ИТЭФ и GSI

	Энергия протонов (E_p , МэВ)					Все энергии, все продукты
	300	500	750	1000	1500	
ИТЭФ – GSI ($A < 30$)	3.14	1.67	1.33	1.25	1.14	1.34
ИТЭФ – GSI ($A > 30$)	1.34	1.28	1.28	1.28	1.25	
ИТЭФ – GSI	1.53	1.37	1.28	1.28	1.23	

В Главе 6 приведены результаты моделирования экспериментальных результатов с использованием различных ядерных моделей, в составе высокоэнергетических транспортных программ: MCNPX (BERTINI, ISABEL), CEM03.02, INCL4+ABLA, INCL4.4.5+ABLA07, PHITS, CASCADE07. Вычисления проводилось при 25 энергиях протонов от 0,03 до 3,5 ГэВ с целью получения гладких функций возбуждения, распределений массовых выходов и статистик отношений расчетных выходов к экспериментальным. Все расчёты проводились перед получением экспериментальных данных. При таком подходе сравнения выявляют реальную предсказательную, а не описательную, способность программ. Для достижения корректного сравнения с экспериментальными данными необходимые кумулятивные выходы были рассчитаны с использованием формул (12,13). Метастабильные продукты реакций не учитывались. Сравнение расчетных и экспериментальных функций возбуждения представлено как качественно (в виде графиков, рис.9), так и количественно (в виде отношения расчётных и экспериментальных среднеквадратичных факторов отклонения $\langle F \rangle$, (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Значения среднеквадратичного фактора отклонения $\langle F \rangle$ для ^{nat}Cr и ^{56}Fe

Модель	Образец	Энергия, МэВ										
		40	70	100	150	250	400	600	800	1200	1600	2600
BERTINI	Cr	3.54	3.06	3.27	2.42	1.86	4.39	2.82	4.14	2.96	2.63	2.26
	Fe	5.86	3.06	3.81	2.64	2.98	3.47	2.77	2.14	2.86	2.57	2.27
ISABEL	Cr	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29	5.29
	Fe	4.94	5.21	6.15	3.23	2.90	3.66	5.07	4.77	2.86	2.57	2.27
CEM03.02	Cr	2.28	3.44	2.52	1.79	2.10	1.57	1.55	1.67	1.90	1.95	2.71
	Fe	3.88	3.98	2.57	2.12	2.01	2.34	1.81	1.83	1.83	1.96	2.90
INCL4+ABLA	Cr	3.84	2.43	2.45	4.17	2.37	2.59	3.32	2.96	2.52	2.35	3.97
	Fe	3.17	3.40	5.10	3.53	3.61	4.35	5.31	6.74	3.18	3.00	3.91
PHITS	Cr	5.36	3.32	4.83	3.69	3.81	3.03	2.36	2.19	2.05	2.16	2.15
	Fe	2.84	5.45	4.99	4.21	3.22	3.26	2.46	2.68	2.24	2.19	2.76
INCL4.5.5+ABLA07	Cr	2.24	1.75	1.58	1.61	1.83	1.58	1.70	1.85	1.83	1.76	2.09
	Fe	2.50	3.46	1.81	1.76	2.63	2.62	1.75	1.62	1.69	1.65	2.11
CASCADE07	Cr	2.61	3.27	3.02	2.87	3.26	2.93	2.78	2.80	5.34	5.04	4.93
	Fe	5.92	4.23	3.33	2.93	3.57	3.96	3.35	3.24	5.47	4.90	4.54

На рис. 9. приведены наиболее характерные расчетные и экспериментальные сечения измеренных $^{56}\text{Fe}(p,x)$ реакций.

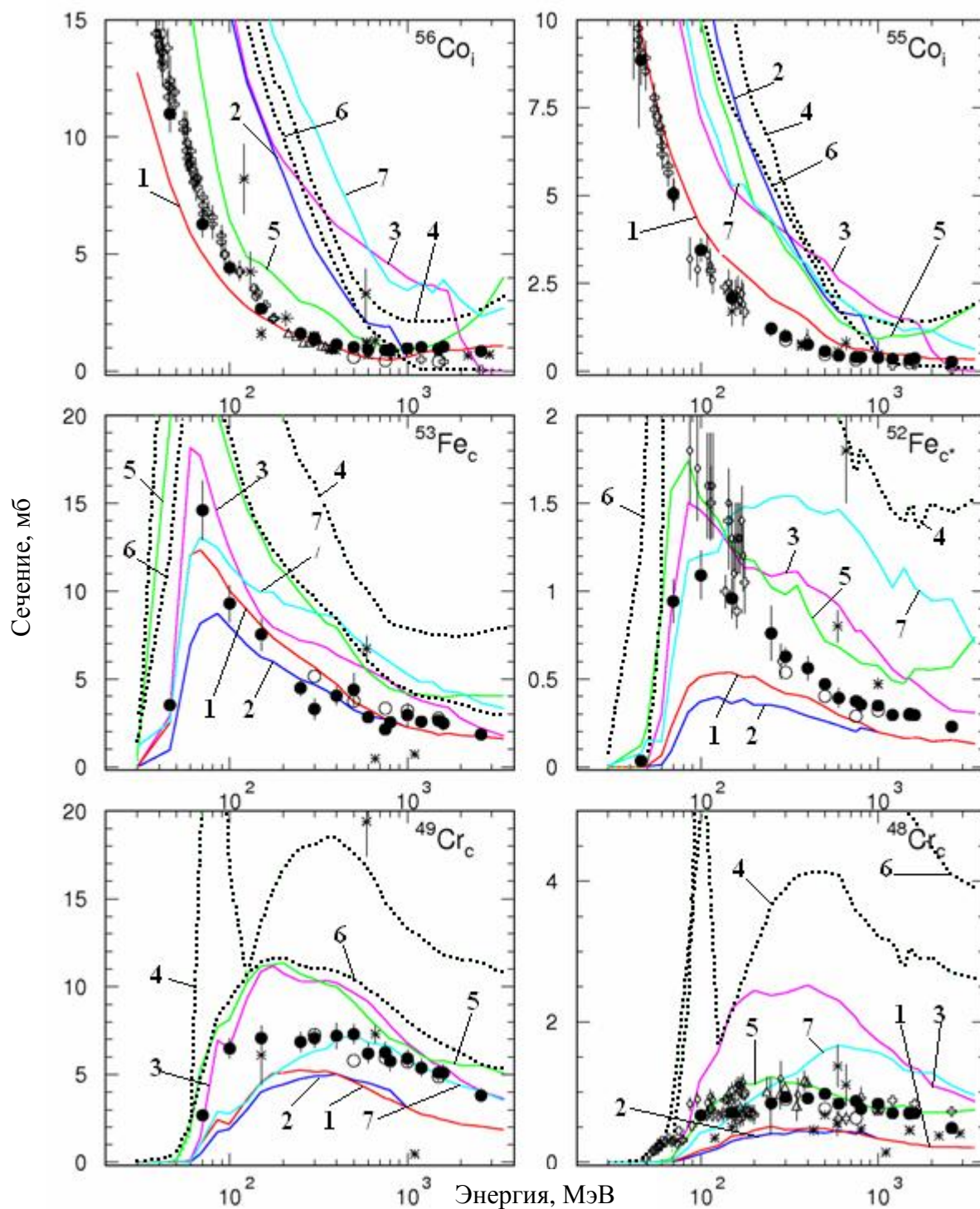


Рис. 9. Расчетные и экспериментальные сечения измеренных $^{56}\text{Fe}(p,x)$ реакций. Экспериментальные точки: ● – данная работа, ○ – работы GSI, ⊕ – работы R.Michel, ◇ – работы M. Fassbender, * – работы других лабораторий. Расчеты: 1 – MCNPX(BERTINI), 2 – MCNPX(ISABEL), 3 – CEM03.02, 4 – INCL4+ABLA, 5 – INCL4.4.5+ABLA07, 6 – CASCADE.07, 7 – PHITS

Для наглядного сравнения предсказательной способности программ, результаты из таб.4 представлены в виде гистограмм (рис.10 и 11)

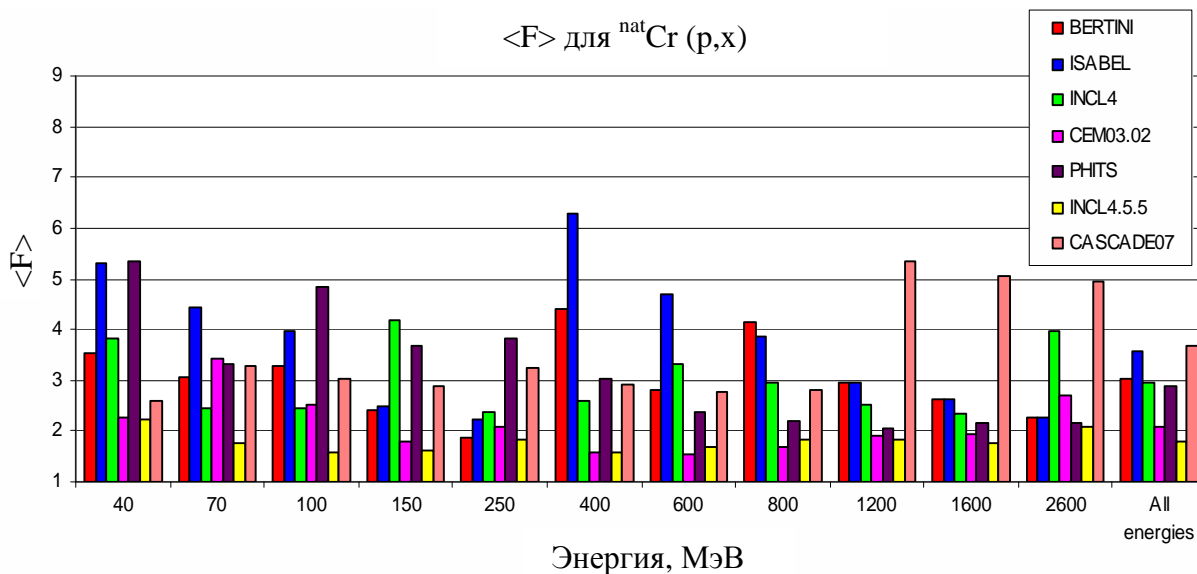


Рис. 10. Предсказательная способность программ BERTINI, ISABEL, INCL4+ABLA, CEM03.02, PHITS, INCL4.5.5+ABLA0.7, CASCADE07 для ^{nat}Cr в диапазоне энергий (0.04 – 2.6) ГэВ

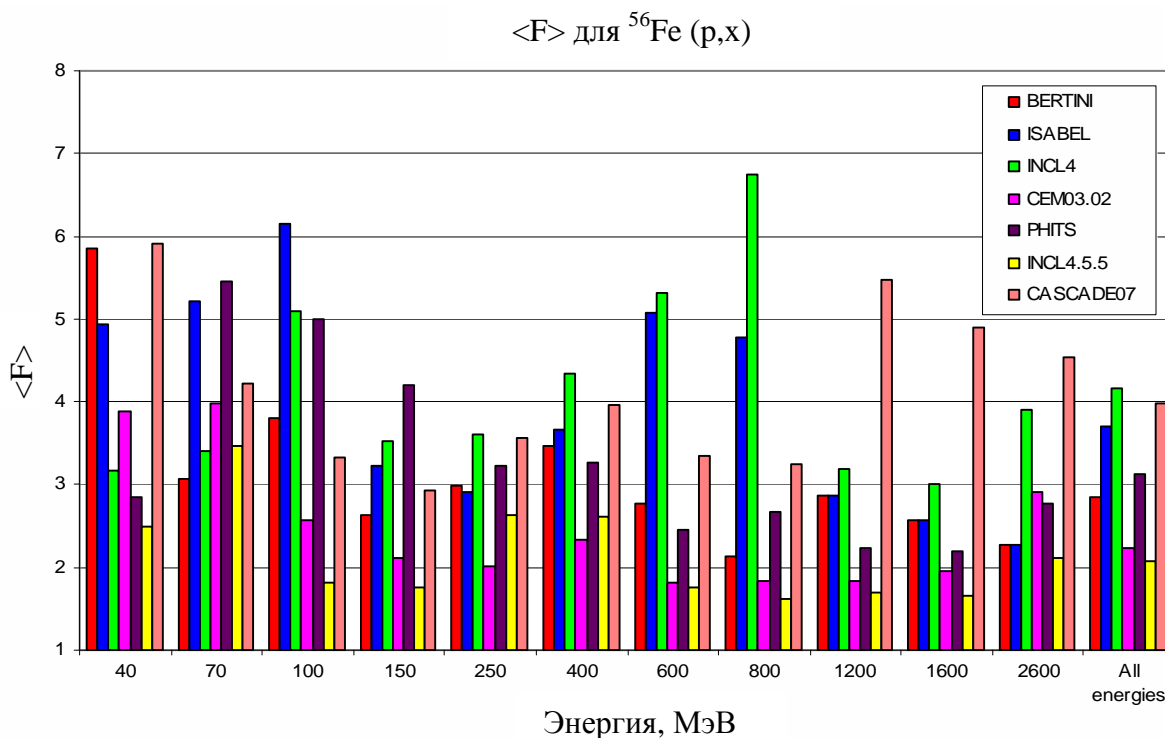


Рис. 11. Предсказательная способность программ BERTINI, ISABEL, INCL4+ABLA, CEM03.02, PHITS, INCL4.5.5+ABLA0.7, CASCADE07 для ^{56}Fe в диапазоне энергий (0.04 – 2.6) ГэВ

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

- 1) Выполнен обзор перспективных концепций ЭЛЯУ. Обоснован список материалов, исследование ядерно-физических характеристик которых является первоочередным для конструирования и эксплуатации ЭЛЯУ.
- 2) Систематизированы имеющиеся к настоящему времени сведения о сечениях образования радиоактивных продуктов реакций, образующихся при взаимодействии протонов промежуточных энергий с упомянутыми выше материалами.
- 3) Обосновано использование для экспериментального определения сечений образования радиоактивных продуктов реакций метода прямой γ -спектрометрии облученных на ускорителе образцов без предварительной химической сепарации, как обеспечивающее значительный объем получаемых данных за сравнительно короткое время при разумных затратах на проведение экспериментов. Предложена методика определения сечений по результатам γ -спектрометрических измерений. Обоснован выбор реакции $^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$ в качестве мониторинговой.
- 4) Описано проведение экспериментов на пучке ускорителя У-10 ИТЭФ. Подробно обсуждаются технические особенности эксперимента.
- 5) Определены сечения образования радиоактивных продуктов реакций для важнейших конструкционных материалов ЭЛЯУ: ^{56}Fe при энергиях протонов 0.04, 0.07, 0.1, 0.15, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.6 и 2.6 ГэВ и $^{\text{nat}}\text{Cr}$ при энергиях протонов 0.04, 0.07, 0.1, 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 и 2.6 ГэВ. Всего получено 831 значение сечений образования. Часть значений получена впервые. Полученная информация передана для научного и практического использования в библиотеку ядерных данных EXFOR. В тех случаях, когда это возможно, полученные значения сечений сравнены с данными аналогичных экспериментов, выполненных в других исследовательских группах. В большинстве случаев в ходе сравнения наблюдается хорошая согласованность сопоставляемых значений сечений, что свидетельствует о достаточной общей степени достоверности полученных в диссертации данных. В то же время результаты сравнения демонстрируют новизну и методическое совершенство работы автора, поскольку количество представленных в ней значений

сечений образования радиоактивных продуктов реакции значительно превышает объем данных, используемых для сравнения.

Результаты, полученные в ходе сравнения данных ^{56}Fe , полученные в настоящей работе и в GSI, позволяют сделать заключение, что их можно отнести к классу бенчмарк - экспериментов, назначение которых – верификация ядерных моделей в составе высокоэнергетичных транспортных программ.

Автор выражает глубокую благодарность:

- 1) коллегам по лаборатории Фундаментальных ядерно-физических исследований ФГУП «ГНЦ РФ ИТЭФ» за помощь при выполнении экспериментальных и расчетных исследований, описанных в диссертации;
- 2) сотрудникам синхротрона ИТЭФ У-10 за обеспечение 11 типов режимов работы ускорителя, используемых при облучении мишеней из ^{56}Fe и $^{\text{nat}}\text{Cr}$;
- 3) Международному Научно-Техническому Центру и Госкорпорации РОС-АТОМ за финансовую поддержку представленных в диссертации исследований.

Личное участие автора. Автор принимал непосредственное участие в качестве полноправного участника научной группы в исследованиях, описанных в диссертации, на всех этапах их выполнения: анализе литературных данных; развитии экспериментальной методики; определении сечений образования радиоактивных продуктов реакций; оптимизации режимов облучения; подготовки и облучении образцов; анализе мониторинговых реакций; измерении γ -спектров облученных образцов и их обработке; получении и вычислении значений сечений, интерпретации полученных результатов. Определение номенклатуры исследуемых материалов и энергий налетающих протонов, выбор типа мониторинговой реакции, а также сравнение экспериментальных и расчетных результатов были проведены автором совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Результаты работы лично докладывались автором на:

1. Юбилейной научной сессии-конференции секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященная 60-летию ИТЭФ. 5 - 9 декабря 2005 года;

2. Международной конференции “NUFRA2007-International Conference on Nuclear Fragmentation”, Antalya (Kemer), September 24-October 1, 2007;
3. Рабочей встрече участников Координационного Исследовательского Проекта «Анализ Ядерных Моделей и Программ», Париж, СЕА, Saclay, февраль 2010 г.
4. Научной сессии НИЯУ МИФИ-2010, Обнинск, январь 2010 г.

Публикации автора по теме диссертации

1. Titarenko Yu.E., Batyaev V.F., Titarenko A.Yu., ... Butko M.A. e.a. Cross sections for nuclide production in a ^{56}Fe target irradiated by 300, 500, 750, 1000, 1500, and 2600 MeV protons compared with data on a hydrogen target irradiated by 300, 500, 750, 1000, and 1500 MeV/nucleon ^{56}Fe ions, PHYSICAL REVIEW C, 78, 034611 (2008).
2. Титаренко Ю.Е., Батяев В.Ф., Бутко М.А. и др. Образование остаточных радиоактивных ядер-продуктов в тонких мишенях из ^{209}Bi , $^{\text{nat}}\text{Pb}$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , облучаемых протонами с энергиями от 0.04 до 2.6 ГэВ. Ядерная физика, 2007, том 70, №7, с.1188-1192.
3. Titarenko Yu.E., Batyaev V.F., Titarenko A.Yu., ... Butko M.A. e.a. Residual nuclide formation in $^{206,207,208,\text{nat}}\text{Pb}$ and ^{209}Bi induced by 0.04-2.6 GeV Protons as well as in ^{56}Fe Induced by 0.3-2.6 GeV Protons. International Conference on Nuclear Data, Nice Acropolis, 22 - 27 April 2007 p. 1099-1102.
4. Titarenko Yu., Batyaev V., Pavlov K., ... Butko M., e.a. Fragmentation products from 0.3-0.6 GeV proton-irradiated ^{56}Fe . “NUFRA2007-International Conference on Nuclear Fragmentation”, Antalya (Kemer), September 24-October 1, 2007 <http://fias.uni-frankfurt.de/nufra2007/>
5. Titarenko Yu.E., Batyaev V.F., Butko M.A. e. a. Benchmarking the codes against residual nuclide spallation data obtained recently, Second Advanced Workshop on Model Codes for Spallation Reactions, 8-11 February 2010, СЕА, Saclay, France, <http://nds121.iaea.org/alberto/mediawiki-1.6.10/images/0/08/Titarenko.pdf>
6. Батяев В.Ф., Бутко М.А., Павлов К.В. и др. Экспериментальное определение сечений образования ядер-продуктов в тонких мишенях из ^{56}Fe и $^{\text{nat}}\text{Cr}$ при облучении протонами с энергиями в диапазоне 40-2600МэВ. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010, Аннотации докладов, Том 1, Ядерная физика и энергетика, с.230 (2010)