

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

на правах рукописи

УДК 621.039

Б-28

БАТЯЕВ

Вячеслав Феликсович

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Специальность: 05.13.16 – применение вычислительной техники,
математического моделирования и математических методов в научных
исследованиях

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

ДУБНА – 1999

Работа выполнена в ГНЦ РФ Институте теоретической и экспериментальной Физики, г. Москва

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Титаренко Ю.Е.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Барашенков В.С.

доктор физико-математических наук,
доцент Севастьянов Л.А.

Ведущая организация: ГНЦ РФ Физико-энергетический институт,
г. Обнинск.

Защита диссертации состоится " 28 " января 2000г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ по адресу: г.Дубна Московской области, ЛВТА ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " 27 " декабря 1999г.

Ученый секретарь Совета,
кандидат физико-математических наук

З.М.Иванченко

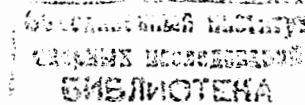
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время одной из причин сдерживания развития ядерной энергетики является проблема радиоактивных отходов. В последнее десятилетие во многих странах, включая РФ, начались активные поиски способов уменьшения радиотоксичности отходов. В настоящее время нет общепризнанной концепции решения этой проблемы. Одним из вариантов решения проблемы обращения с радиоактивными отходами является создание т.н. электроядерных установок (ЭЛЯУ), отличающихся от традиционных ядерных реакторов наличием мощного нейтронного источника, осуществляющего работу установок в подкритическом режиме. Проектирование нейтронного источника, работающего под действием высокоточного ускорителя протонов с энергией порядка 1 ГэВ, требует привлечение программ, активно использующихся в физике высоких энергий, но не использовавшихся ранее в прикладных реакторных расчетах. Так как в настоящее время отсутствует опыт их использования для проектирования нейтронных источников ЭЛЯУ требуемой мощности, встает вопрос о верификации этих программ.

Целью диссертационной работы явились верификация программ, используемых для расчета параметров мишенных устройств, на основе ядерных данных полученных в ИТЭФ экспериментально на материалах, предполагаемых в качестве мишенных и конструкционных материалов ЭЛЯУ, а также оптимизационные расчеты основных ядерно-физических параметров мишенных устройств ЭЛЯУ, проектируемых в ИТЭФ.

В рамках поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) проведен анализ соответствия необходимой расчетной и имеющейся экспериментальной точности основных параметров мишеней из тяжелых материалов при облучении их протонами высоких энергий;
- 2) определен набор параметров, наиболее пригодных для верификации расчетных программ;
- 3) разработана методика сравнения экспериментальных результатов по выходу ядер-продуктов с результатами, полученными с помощью различных используемых в настоящее время программ;
- 4) выполнена верификация этих программ путем сравнения расчетных и экспериментальных значений выходов ядер-продуктов из тонких и толстых мишеней;
- 5) создан взаимосвязанный самосогласованный комплекс программ для расчета ядернофизических параметров толстых мишеней;



б) выполнены расчеты параметров мишенных устройств ЭЛЯУ, проектируемых в ИТЭФ с целью их оптимизации.

Научная новизна

1. Впервые изучена точность используемых программ для моделирования параметров мишенных устройств из тяжелых материалов.

2. Разработана методика сравнения экспериментальных и расчетных результатов по независимым и кумулятивным выходам ядер-продуктов в тонких мишенях.

3. Проведена верификация основных используемых в настоящее время программ путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными по выходам ядер-продуктов из материалов, предполагаемых для использования в качестве мишенных и конструкционных материалов ЭЛЯУ.

4. Рассчитаны основные ядерно-физические параметры проектируемых в ИТЭФ мишенных устройств ЭЛЯУ.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы состоит в исследованной точности расчетов основных ядерно-физических параметров мишенных устройств ЭЛЯУ. Особенность данной работы, отличающей ее от других подобных работ (напр. ¹), состоит как в использовании широкого набора программ, применяемых для расчета ЭЛЯУ, так и в использовании набора экспериментальных данных, требуемых строго для проектирования ЭЛЯУ.

Выявленная точность программ наглядно демонстрирует потенциальные величины ошибок, которые могут иметь место при использовании расчетных программ без экспериментальной поддержки.

Точность продемонстрирована на примере широкого пакета программ, включающих широкий спектр моделей внутриядерного взаимодействия и активно использующихся для расчетов параметров ЭЛЯУ, как в РФ, так и за рубежом.

Точность программ продемонстрирована по: (1) независимым и кумулятивным выходам ядер-продуктов в тонких мишенях из мишенных и конструкционных материалов ЭЛЯУ; и (2) скоростям реакций на поверхности толстой W-мишени, облученной протонами с энергией 1 ГэВ.

¹R. Michel, P. Nagel, International Codes and Model Intercomparison for Intermediate Energy Activation Yields, NSC/DOC(97)-1, NEA/P&T No 14.

1. Тонкие мишени. Для корректного сравнения расчетных результатов с экспериментальными создана методика сличения экспериментальных и расчетных результатов по выходам независимых и кумулятивных ядер-продуктов в тонких мишенях, базирующаяся на методике экспериментального получения непосредственно в ИТЭФ кумулятивных и независимых выходов ядер-продуктов.

Используя более 720 экспериментальных значений выходов ядер-продуктов на ядрах-мишенях конструкционных материалов ЭЛЯУ, измеренных в ИТЭФ (облучались ²⁰⁹Bi, ^{nat}Pb, ²⁰⁸Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb, ⁶³Cu, ⁶⁵Cu, и ⁵⁹Co протонами низких (0.07 – 0.2 ГэВ) и высоких (1.2 и 1.5 ГэВ) энергиях); было выполнено сравнение с ними расчетных результатов, полученных по программам: CEM95, CASCADE, INUCL, HETC, LANET, GNASH, ALICE, QMD, NUCLEUS, YIELDX, и полуэмпирической формуле Foshina et al.

После обобщения результатов сравнения сделан вывод о точности расчета программ как недостаточной для непосредственного использования в проектных расчетах.

Представлена рекомендация по использованию конкретных программ в зависимости от сочетания мишень/продукт/энергия, что является базой для дальнейшего развития программ. Выявлены программы, дающие наиболее точные значения выходов ядер-продуктов.

2. Толстая W-мишень. Используя программы LANET, CEM95, INUCL и CASCADE для моделирования скоростей реакций на поверхности толстой W-мишени было проведено сравнение расчетных значений скоростей пороговых реакций активационных детекторов (In, Au, Al) с экспериментальными значениями, полученными в ИТЭФ.

Выявлено, что точность расчета скоростей реакций является сходной с точностью расчета выходов продуктов в тонких мишенях. Сделаны предварительные выводы о вкладе различных составляющих расчета (спектры нейтронов, сечения) в ошибки скоростей реакций.

Кроме демонстрации точности программ, в работе представлены результаты расчетов мишенных устройств, проектируемых в ИТЭФ в рамках международного проекта по изучению осуществимости трансмутации радиоактивных отходов ядерной энергетики. Выполнен подбор ряда геометрических параметров мишенных устройств для получения оптимальных ядерно-физических параметров.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались на: International Workshop on Nuclear Methods of Transmutation of Nuclear Wastes: Problems, Perspectives, Cooperative Research, Dubna, Russia, May 29-31, 1996; Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, Sweden, June 3-7, 1996; XI Международном семинаре по точным измерениям в ядерной спектрометрии, 2-6 сентября 1996, Саров; International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, May 19-24, 1997, Trieste, Italy; 3rd Specialists' Meeting on High Energy Nuclear Data, March 30-31, 1998 at JAERI, Tokai, Ibaraki-ken, Japan; Second International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98), Gatlinburg, TN, USA, September 20-23, 1998; 3rd International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, June 7-11, 1999; Third International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'99), Long Beach, CA, USA, November 14-18, 1999.

Основные результаты работы опубликованы в сборниках указанных конференций, в виде препринтов ИТЭФ и LANL, а также в журналах ВАНТ Сер. "Физика Ядерных Реакторов" и "Nucl. Instr. and Meth."

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Она изложена на 147 страницах, включая 43 рисунка, 44 таблицы и список литературы из 169 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во Введении описано назначение электроядерных установок и дан краткий обзор проектируемых мишенных устройств для реализации ЭЛЯУ, который показывает наиболее часто предлагаемые мишенные материалы, энергии и мощности протонных пучков. Представлены необходимые для проектирования параметры мишенных устройств, а также основные методы и программы, используемые для их моделирования. Поставлена задача по необходимости исследования точности расчетов активно используемых в настоящее время программ.

В Главе 1 проведено исследование экспериментальной и расчетной точности основных параметров мишеней. Показана удовлетворительная (~15%), по большинству программ, точность расчета полного нейтронного выхода и полного энерговыделения. Используя экспериментальные данные показано, что данная точность соответствует по порядку величины экспериментальной точности. Показана менее удовлетворительная (~30%) точность расчетов локального энерговыделения, в первую очередь, за счет продуктов ядерных взаимодействий. Показана неудовлетворительная точность (фактор 2 и выше) расчета выходов ядер-продуктов. Это позволило сделать выбор в пользу выхода ядер-продуктов как параметра для верификации программ. Показана необходимость использования изотопных мишеней для накопления ядерных данных для верификации программ. Проведен статистический анализ адронного каскада в толстой мишени, в результате показаны диапазоны энергий нуклонов, принимающих наибольшее участие в межъядерном каскаде, и, следовательно, наиболее важные для верификации программ.

В Главе 2 проведен обзор существующих ядерных данных по выходам ядер-продуктов из тонких мишеней материалов-кандидатов в мишенные устройства, облучаемых протопами высоких энергий. Показано отсутствие пригодных для верификации данных для изотопов свинца. Показана недостаточность данных для висмута, недостаточность данных по выходу короткоживущих ядер-продуктов.

В связи с тем, что большая часть экспериментальных данных содержит кумулятивные выходы, была разработана методика сравнения результатов различных программ с экспериментальными значениями по независимым и кумулятивным выходам ядер-продуктов. Методика согласована с разработанной в ИТЭФ экспериментальной методикой определения выходов ядер-продуктов.

Используя эту методику было проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных по выходам ядер-продуктов.

В сравнении использовались:

1. Экспериментальные результаты по выходам ядер-продуктов в: ^{209}Bi , ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb , облученных протонами с энергией 0.13 и 1.5 ГэВ; ^{nat}Pb , облученном с энергией 1.5 ГэВ; ^{59}Co , облученном протонами с энергией 0.07, 0.10, 0.13 и 1.2 ГэВ; ^{63}Cu , ^{65}Cu , облученных протонами с энергией 0.13, 1.2 и 1.5 ГэВ.
2. Результаты моделирования экспериментально измеренных ядер-продуктов используя программы:
 - каскадно-экситонную SEM95,
 - каскадно-испарительно-делительную CASCADE,
 - каскадно-предравновесно-испарительно-делительную INUCL,
 - каскадно-испарительную HETC,
 - каскадно-испарительно-делительную LANET,
 - предравновесно-испарительную GNASH,
 - предравновесно-испарительную ALICE,
 - квантово-молекулярно-динамическую QMD,
 - каскадно-испарительно-делительную NUCLEUS,
 - полуфеноменологическую YIELDX,
 - полуфеноменологическую формулу Foshina.

Результаты сравнения представлены в виде таблиц и рисунков поуклидного сравнения, таблиц и рисунков статистических отклонений "расчет/эксперимент" и в виде рисунков массовых выходов. Сделаны выводы о сходимости расчетных и экспериментальных результатов по каждой программе, группе ядер и энергии. Рассчитаны среднеквадратичные отклонения расчетных результатов от экспериментальных по четырем основным наборам ядра-мишени/энергия и сделаны выводы только о качественном соответствии большинства значений выходов моделируемых по всем программам ядер-продуктов экспериментальным результатам. Показано, например, что в случае тяжелых ядер (свинец, висмут) облучаемых при высоких энергиях, наилучшей предсказательной силой обладает программа SEM95, предсказывающая выходы ядер-продуктов со среднеквадратичным отклонением 1.92, т.е. с точностью на уровне всего лишь $\pm 100\%$.

В Главе 3 представлен взаимосвязанный самосогласованный комплекс программ для расчета ядерно-физических параметров толстых мишеней, используя программы

HETC, MCNP, SPECT, EGS, TWODANT, баз данных ENDF/B и БНАБ. Произведена модификация программы SPECT для расчета требуемых параметров мишенных устройств, включая нейтронный выход, потоки каскадных частиц, полное и локальное энерговыделение. Разработана и реализована методика расчета парциального энерговыделения в компонентах смеси, заданной гомогенно.

Используя эти программы проведены оптимизационные расчеты параметров мишенных устройств, представленных для проектирования ЭлЯУ. Были проанализированы две жидкосвинцовые, свиноцовой-висмутовая, вольфрамовая и свинцово-тяжеловодная мишени, предложенные для проектной реализации в ходе ряда проектов по исследованию ЭлЯУ. В ходе оптимизаций получены:

- наиболее оптимальные соотношения диаметров пучков и мишенного материала в случае свинцово-(висмутовой) мишени, принимая во внимание выход нейтронов и недопустимость локального перегрева мишенного материала;
- наиболее оптимальное количество добавки бериллия для увеличения нейтронного выхода за счет (п,хп) реакций;
- зависимость выхода нейтронов свинцово-тяжеловодной композиции в зависимости от пористости;
- наиболее оптимальные соотношения диаметров сканируемого пучка для достижения максимальных нейтронных потоков, используя газоохлаждаемые свинцовые и вольфрамовые мишени.

Исследована проблема первой стенки (окна) по энерговыделению. Исследована зависимость максимального удельного энерговыделения от использования различных материалов в качестве конусного окна мишени.

В **Заключении** обобщены результаты исследований и сделаны выводы о необходимости проведения дальнейшей наработки экспериментальных данных и на их основе - продолжения совершенствования теоретических моделей и программ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Создан взаимосвязанный комплекс программ для расчета нейтронофизических параметров толстых мишеней, используя программы HETC, MCNP, SPECT, EGS, TWODANT, баз данных ENDF/B и БНАБ (рис. 1). Проведена модификация программы SPECT для расчета требуемых параметров мишенных устройств, включая нейтронный выход, потоки каскадных частиц и полное и локальное энерговыделение (рис. 2). Разработана и реализована методика расчета парциального энерговыделения в компонентах смеси, заданной гомогенно.

Выполнена модернизация программы HETC путем включения в нее альтернативных модулей из программ CEM95 и INUCL, моделирующих адрон-ядерные взаимодействия.

2. Показана удовлетворительная (~15%), по большинству программ, точность расчета полного нейтронного выхода и полного энерговыделения. Используя экспериментальные данные показано, что данная точность соответствует по порядку величины экспериментальной точности. Показана менее удовлетворительная (~30%) точность расчетов локального энерговыделения, в первую очередь, за счет продуктов ядерных взаимодействий, а также неудовлетворительная точность (фактор порядка 2 и выше) расчета выходов ядер-продуктов.

3. Сделан выбор выхода ядер-продуктов как параметра для верификации программ. Показана необходимость использования изотопных мишеней для накопления ядерных данных для верификации программ.

4. Проведен статистический анализ адронного каскада в толстой мишени, в результате показаны диапазоны энергий нуклонов, принимающих наибольшее участие в межъядерном каскаде, и, следовательно, наиболее приоритетные для верификации программ. Получено, что наиболее существенный вклад в динамику адронного каскада играют диапазоны энергий: $E_0 - 0.25 \text{ ГэВ} - E_0$ (E_0 – исходная энергия налетающего протона) и $0.1 - 0.25 \text{ ГэВ}$ (рис. 3).

5. При проведении обзора существующих ядерных данных по выходам ядер-продуктов из тонких мишеней показано отсутствие пригодных для верификации данных для изотопов свинца и недостаточность данных для висмута, а также недостаточность данных по выходу короткоживущих ядер-продуктов.

6. Разработана методика сравнения результатов различных программ с экспериментальными значениями по независимым и кумулятивным выходам ядер-продуктов.

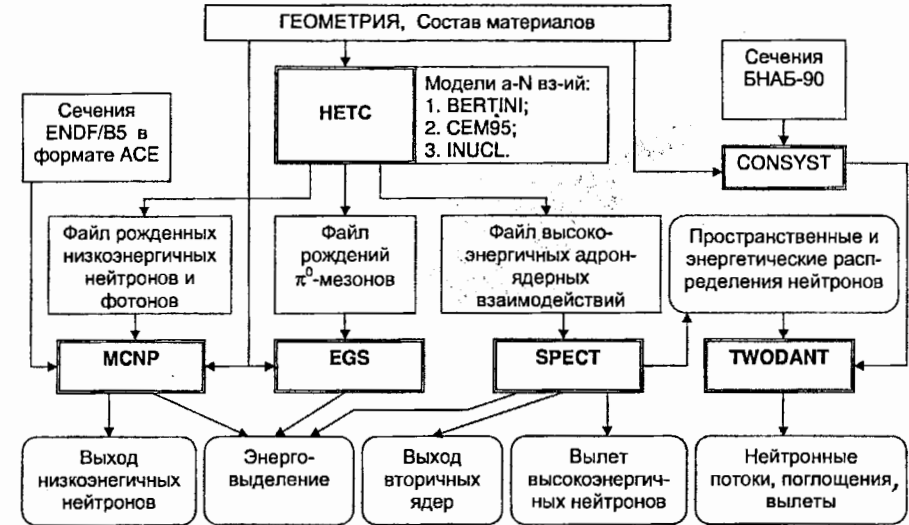


Рис. 1: Схема применения программ для вычисления параметров мишенных устройств ЭЛЯУ.

7. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных по 11 программам по выходам ядер-продуктов.

Результаты сравнения представлены в виде таблиц и рисунков понуклидного сравнения (рис. 4), таблиц и рисунков статистических отклонений "расчет/эксперимент" (табл. 1 и рис. 5) и в виде рисунков массовых выходов (рис. 6). Сделаны выводы о сходимости расчетных и экспериментальных результатов по каждой программе, группе ядер и энергии. Рассчитаны среднеквадратичные отклонения расчетных результатов от экспериментальных по четырем основным наборам ядра-мишени/энергия (табл. 2 и рис. 7, 8) и сделаны выводы только о качественном соответствии большинства моделируемых по программам выходов ядер-продуктов экспериментальным результатам. В частности, показано, что в случае тяжелых ядер (свинец, висмут), облучаемых протонами при высоких энергиях, наилучшая сходимость, представленная программой CEM95, находится чуть лучше фактора 2.0 ($+100\%$). Только в отдельно взятых случаях (программа CASCADE при $^{208}\text{Pb}-0.13\text{ГэВ}$ и CEM95 при $^{63}\text{Cu}-0.13\text{ГэВ}$) программы показали предсказательную силу на уровне требуемой точности для проектных работ (отклонения менее 30%).

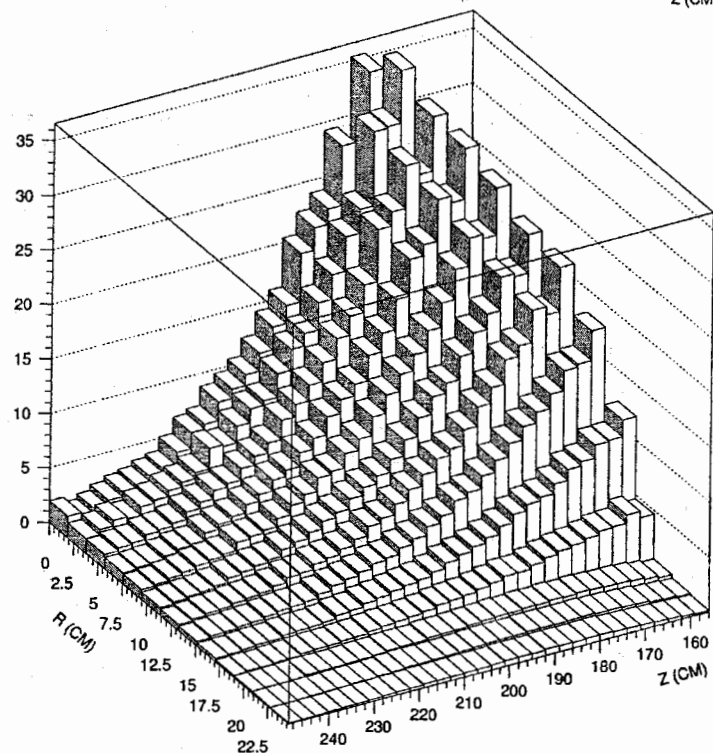
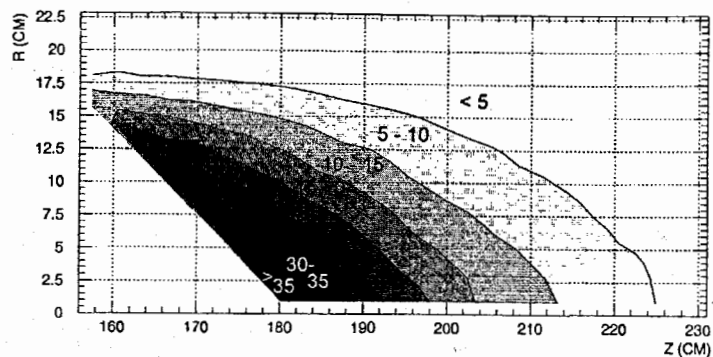


Рис. 2: R-Z распределение удельного энерговыделения (в кэВ/($\rho \cdot \text{см}^2$)) мишени на основе псевдосжиженной $\text{Pb-D}_2\text{O}$ композиции при пористости 0.7.

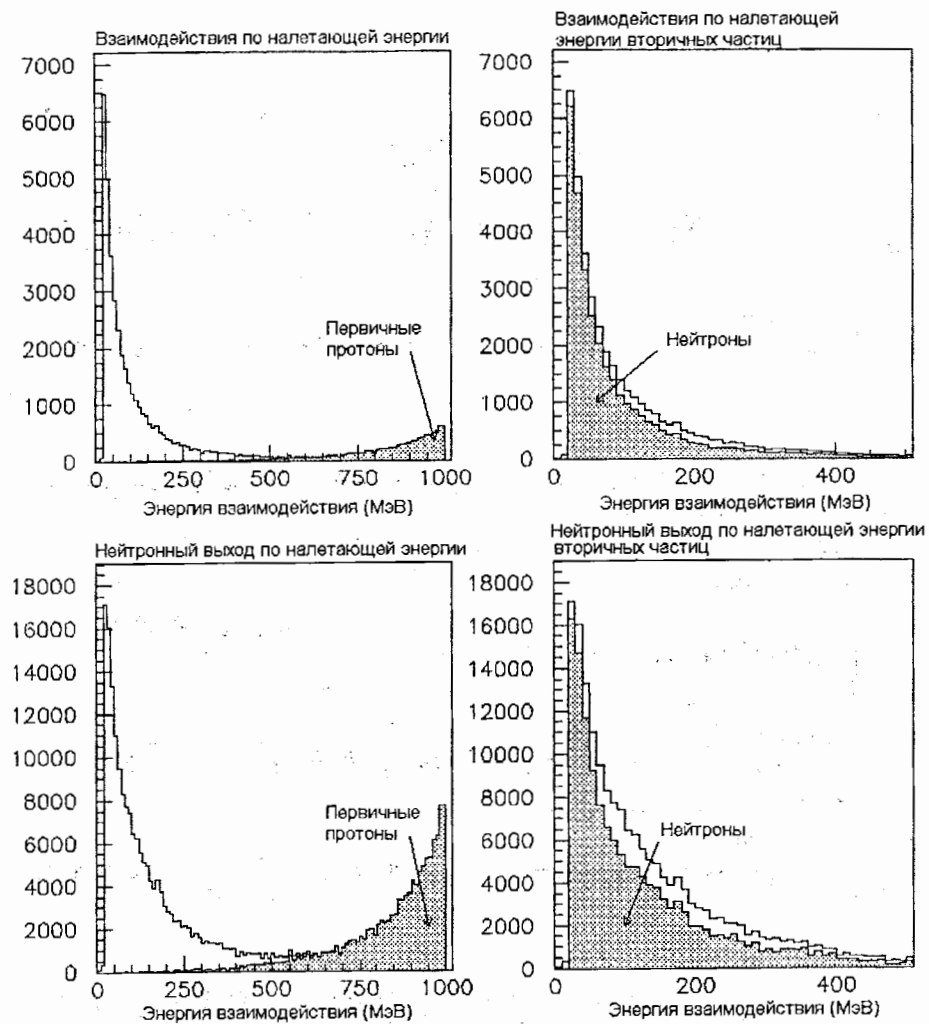


Рис. 3: Статистика адрон-ядерных взаимодействий и генераций низкоэнергичных ($E_n < 20 \text{ МэВ}$) нейтронов в свинцово-висмутовой мишени размером $\varnothing 20 \times 60 \text{ см}$, в зависимости от энергии взаимодействия внутри мишени. Исходная энергия протонов - 1 ГэВ. Расчет с помощью программы HETS с встроенным модулем INUCL. Число исходных протонов - 10000.

выходы продуктов (мбарн)

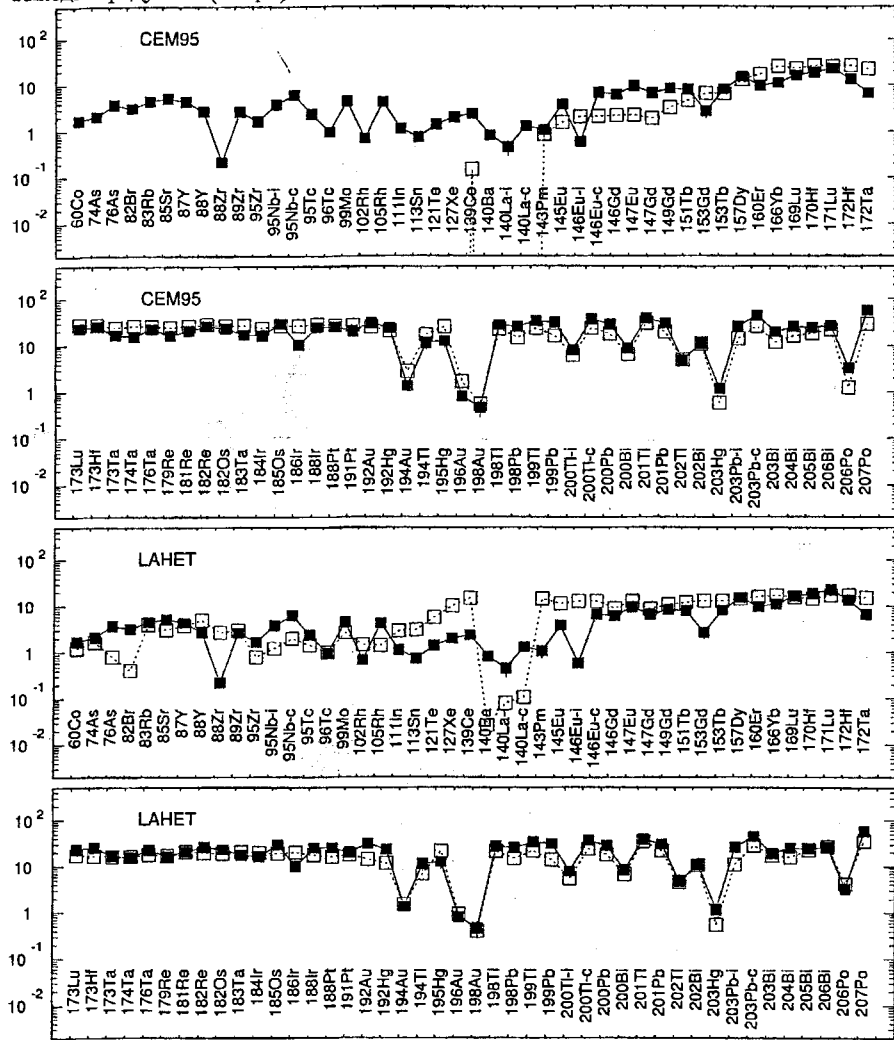


Рис. 4: Сравнение экспериментальных (закрашенные символы) и расчетных значений (в мбарн) по программам SEM95 и LANET (открытые символы) выходов ядер-продуктов в ^{209}Bi , облученного протонами с энергией 1.5ГэВ.

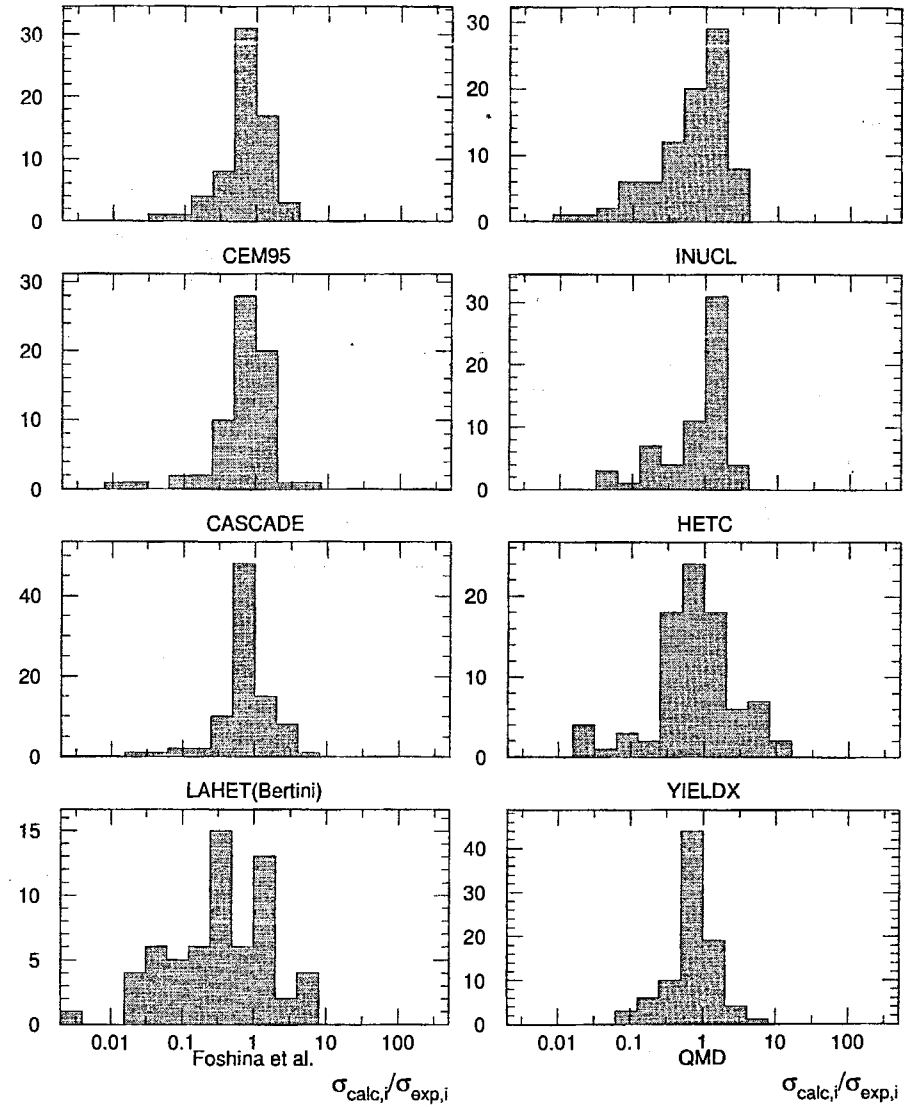


Рис. 5: Статистика отношений расчетных и экспериментальных значений по выходам продуктов в ^{209}Bi , облученным протонами с энергией 1.5 ГэВ

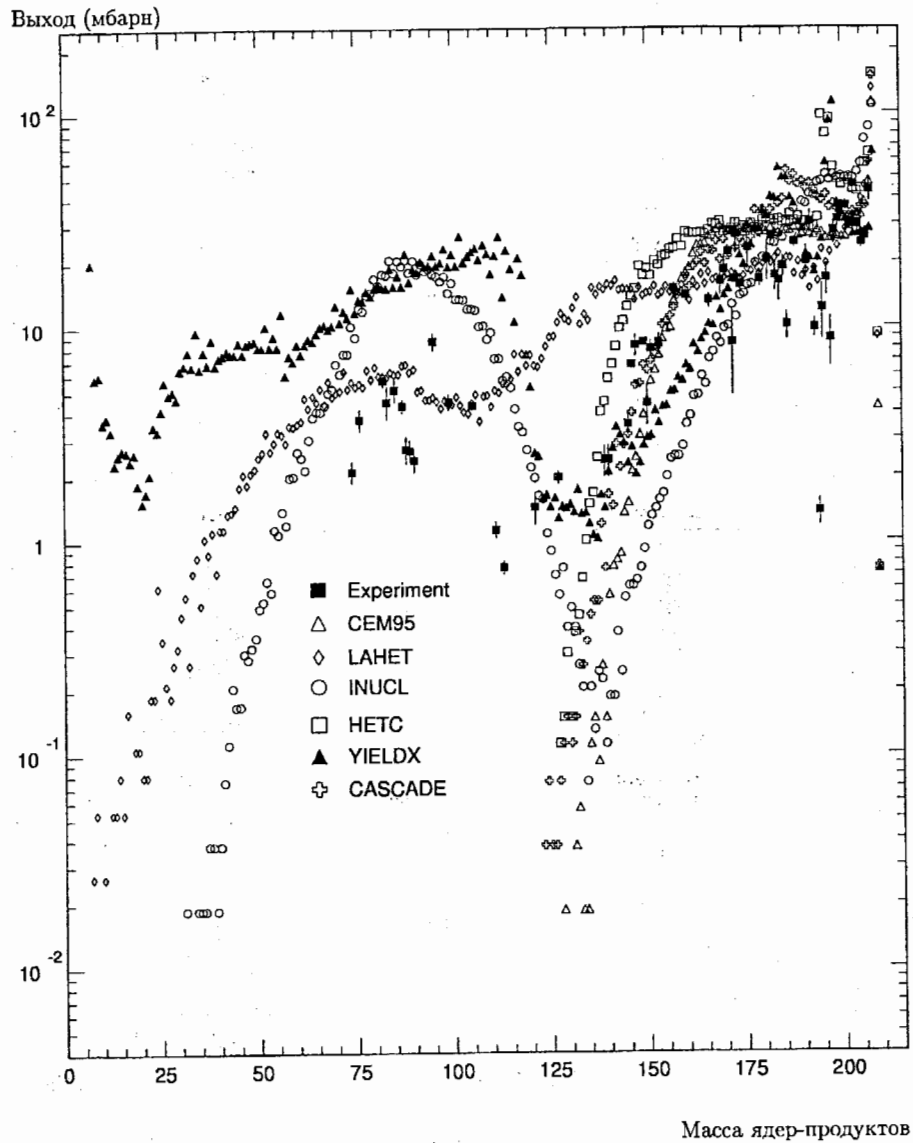


Рис. 6: Массовое распределение продуктов реакции $^{209}\text{Bi}(p,x)$ при облучении протонами с энергией 1.5 ГэВ.

Таблица 1: Статистика сравнений экспериментальных и расчетных результатов выходов ядер-продуктов в ^{209}Bi , облученном протонами с энергией 0.13 и 1.5 ГэВ; N_T – число экспериментальных выходов; N_G – число выходов, отобранных для сравнения; N_S – число выходов, промоделированных программой; $N_{C_{1.3}}$, $N_{C_{2.0}}$ – число промоделированных выходов, отличающихся от экспериментальных значений не более чем в 1.3 и в 2.0 раза, соответственно; $\langle H \rangle$ – среднеквадратичный фактор отклонения расчетных значений выходов ядер-продуктов от экспериментальных; $S(\langle H \rangle)$ – дисперсия фактора отклонения.

Программа	$E_p = 0.13$ ГэВ			$E_p = 1.5$ ГэВ		
	$N_T=26, N_G=24$			$N_T=99, N_G=88$		
	$N_{C_{1.3}}/N_{C_{2.0}}/N_S$	$\langle H \rangle$	$S(\langle H \rangle)$	$N_{C_{1.3}}/N_{C_{2.0}}/N_S$	$\langle H \rangle$	$S(\langle H \rangle)$
CEM95	14/22/24	1.46	1.30	25/48/65	2.38	2.00
INUCL	3/6/24	13.	7.99	29/48/85	3.46	2.72
	3/6/19*	3.22	1.95			
CASCADE	12/22/24	1.63	1.48	27/48/66	2.68	2.31
HETC	8/19/24	2.38	2.05	23/42/61	2.92	2.39
LAHET(ISABEL)	16/23/24	1.39	1.26			
LAHET(Bertini)	16/22/24	1.41	1.27	23/63/87	2.22	1.78
ALICE	13/21/24	1.76	1.59			
GNASH	2/6/9	2.35	1.78			
QMD	8/16/24	2.11	1.67	20/63/87	2.36	1.83
YIELDX	13/21/24	1.52	1.34	18/41/83	3.52	2.47

* с исключением ^{200}Bi , ^{201}Bi , ^{202}Bi , ^{202}Po , и ^{203}Po

Таблица 2: Общая статистика сравнений экспериментальных и расчетных результатов по выходам ядер-продуктов. Обозначения N_T , N_G , N_S , $N_{C_{1,3}}$, $N_{C_{2,0}}$, $\langle H \rangle$, $S(\langle H \rangle)$ даны в оглавлении табл. 1.

Программа	$^{63,65}\text{Cu}$, $E_p=0.13\text{ГэВ}$			^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$, $E_p=1.2, 1.5\text{ГэВ}$		
	^{59}Co , $E_p=0.07, 0.10, 0.13, 0.20\text{ГэВ}$					
	$N_T=92$	$N_G=71$		$N_T=193$	$N_G=161$	
	$N_{C_{1,3}}/N_{C_{2,0}}/N_S$	$\langle H \rangle$	$S(\langle H \rangle)$	$N_{C_{1,3}}/N_{C_{2,0}}/N_S$	$\langle H \rangle$	$S(\langle H \rangle)$
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 , $E_p=0.13\text{ГэВ}$			$^{206,207,208,na}\text{Pb}$, ^{209}Bi , $E_p=1.5\text{ГэВ}$		
	$N_T=90$	$N_G=76$		$N_T=471$	$N_G=418$	
	$N_{C_{1,3}}/N_{C_{2,0}}/N_S$	$\langle H \rangle$	$S(\langle H \rangle)$	$N_{C_{1,3}}/N_{C_{2,0}}/N_S$	$\langle H \rangle$	$S(\langle H \rangle)$
CEM95	37/59/76	2.16	1.94	154/257/327	1.92	1.66
LAHET	42/70/76	1.47	1.28	103/312/417	2.02	1.60
INUCL	23/48/71	2.14	1.68	123/247/414	3.02	2.26
HETC	23/55/76	2.21	1.78	92/215/308	3.29	2.80
CASCADE	34/68/76	1.61	1.40	123/246/330	2.20	1.85
ALICE(Fermi)	39/69/76	1.62	1.44	-	-	-
YIELDX	39/68/76	1.49	1.29	77/199/413	3.23	2.20
QMD	13/40/76	2.32	1.58	88/284/415	2.33	1.80
GNASH	2/6/9***	2.35	1.78	-	-	-

* здесь $N_T = 110$ и $N_G = 93$; ** здесь $N_T = 41$ и $N_G = 34$.

*** было промоделировано только 9 ядер-продуктов

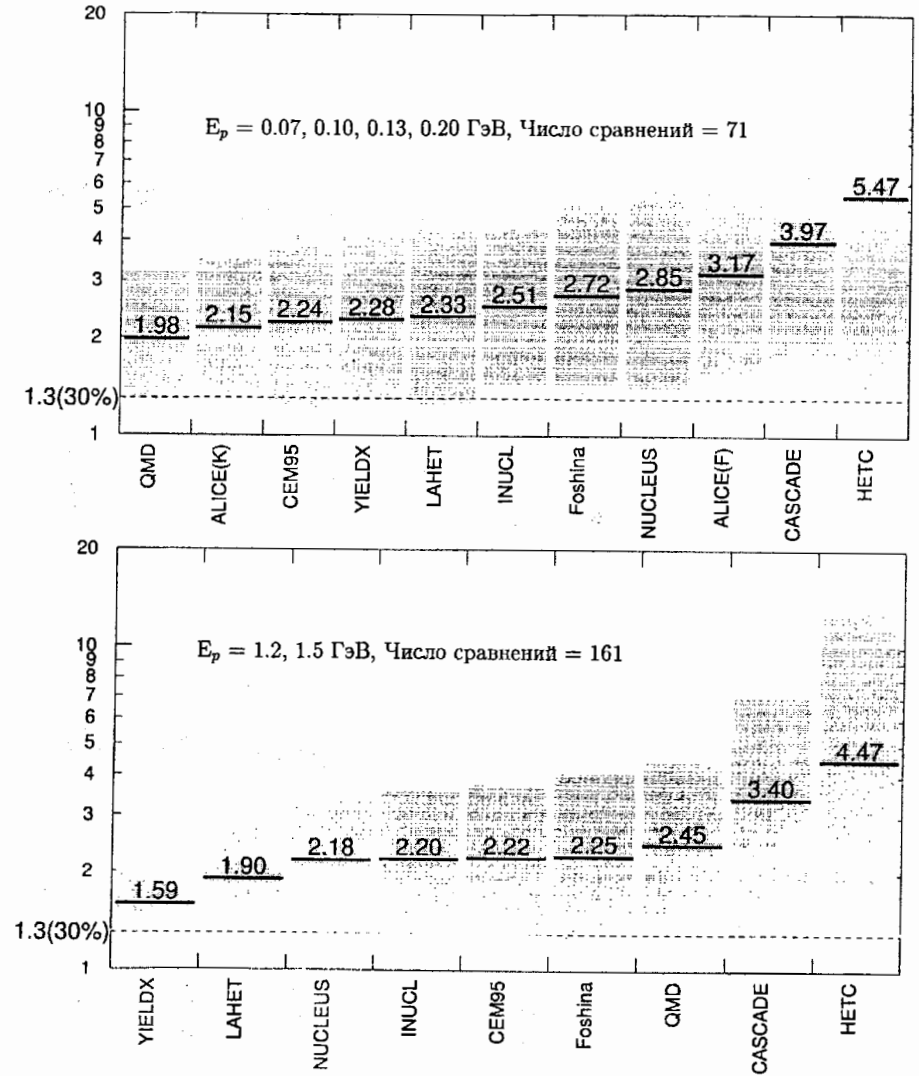


Рис. 7: Общий фактор отклонения по всем отношениям расчетных и экспериментальных значений для "легких" (конструкционных) ядер-мишеней (^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$)

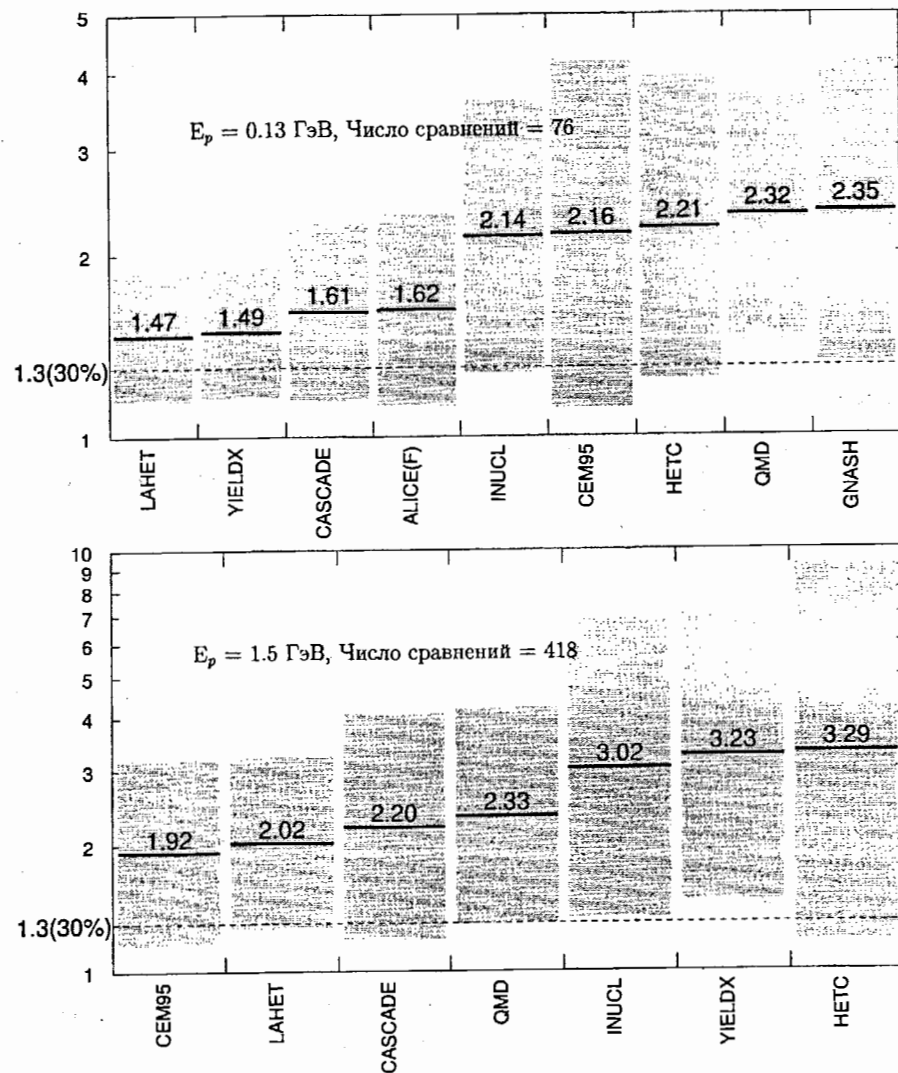


Рис. 8: Общий фактор отклонения по всем отношениям расчетных и экспериментальных значений для "тяжелых" (мишенных) ядер-мишеней (^{209}Bi , $^{208,207,206,204}\text{Pb}$)

8. Проведено сравнение расчетных результатов по четырем программам (LAHET, CEM95, INUCL, CASCADE) с экспериментальными данными по скоростям реакций на поверхности толстой W-мишени. Полученные значения отклонений расчетных результатов от экспериментальных сходны с отклонениями в случае тонких мишеней (факторы 1.6÷2.4). Сделаны предварительные выводы о корректности расчетных спектров и используемых сечений.

9. Проведены расчеты параметров мишенных устройств, предлагаемых для проектирования ЭЛЯУ с целью их оптимизации. Были проанализированы две жидкосвинцовые, свинцово-висмутовая, вольфрамовая и свинцово-тяжеловодная мишени. В ходе оптимизаций получено:

- наиболее оптимальные соотношения диаметров пучков и мишенного материала в случае свинцово-(висмутовой) мишени, принимая во внимание выход нейтронов и недопустимость локального перегрева мишенного материала;
- наиболее оптимальное количество добавки бериллия для увеличения нейтронного выхода за счет (p,xn)-реакций;
- показана нейтронопроизводительность мишени на основе свинцовотяжеловодной композиции как функция ее пористости (рис. 9);
- выявлены наиболее оптимальные соотношения диаметров сканируемого пучка для достижения максимальных нейтронных потоков, используя газоохлаждаемые свинцовые и вольфрамовые мишени.

10. Исследована проблема первой стенки (окна) по энерговыделению. Исследована зависимость максимальных удельных тепловыделений от использования различных материалов в качестве конусного окна.

Таблица 3: Программы, результаты которых отличаются от экспериментальных со средним отклонением менее 2.0.

Мишени	Энергия протонов (ГэВ)	
	≤0.20	1.2, 1.5
“Мишечные” материалы $^{206,207,208}\text{Pb}$, ^{209}Bi	LAHET (1.47) YIELDX (1.49) CASCADE (1.61) ALICE (1.62)	CEM95 (1.92)
“Конструкционные” материалы ^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$	QMD (1.98)	YIELDX (1.59) LAHET (1.90)

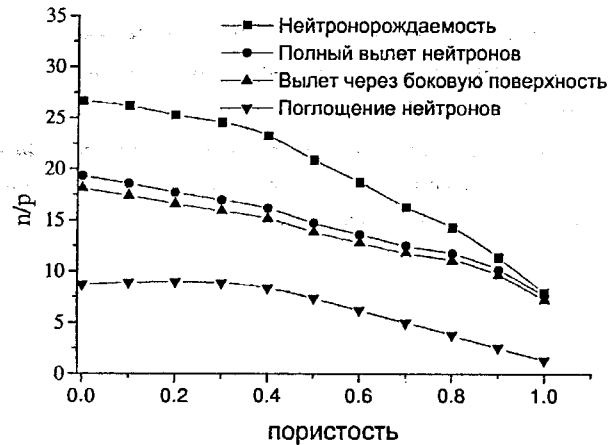


Рис. 9: Нейтронные параметры мишени на основе псевдосжиженной Pb-D₂O композиции в зависимости от пористости.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В РАБОТАХ

- V.F. Batyaev, "Nuclear Data requirements in Intermediate Energy Range for Improvement of Calculations of ADTT Target Process", *Proc. of Int. Workshop on Nucl. Methods of Transmutation of Nuclear Wastes: Problems, Perspectives, Cooperative Research*, Dubna, Russia, May 29-31, 1996, World Scientific, M.Khankhasayev, H.Plendl, Zh.B.Kurmanov (1997), pp. 166-172; В.Ф.Батяев, "Потребности в ядерных данных промежуточных энергий для верификации расчетов мишечных процессов электроядерных установок", *Материалы XI Международного семинара по точным измерениям в ядерной спектроскопии*, 2-6 сентября 1996, Саров, Вопросы атомной науки и техники, Сер. Физика Ядерных реакторов, 1997, ТИЯС-XI, Спец. Выпуск, 179-183.
- 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, M. Blann, "Experimental and Computer Simulation Study of Radionuclide Yields in the ADT Materials Irradiated with Intermediate Energy Protons", *Proceedings of the third Specialists' Meeting on High Energy Nuclear Data*, March 30-31, 1998 at JAERI, Tokai, Ibaraki-ken, Japan, JAERI-Conf 98-016 pp.125-135; 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, M. Blann, "Experimental and Computer Simulation Study of Radionuclide Formation in the ADT Materials Irradiated with Intermediate Energy Protons", *Second Int. Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'98)*, Gatlinburg, TN, Sept. 20-23, 1998, pp. 164-171; 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", *Topical Meeting - Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'99)*, Long Beach, CA, November 14-18, 1999, pp. 212-221.
- Yu. E. Titarenko, O. V. Shvedov, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, A.B. Koldobsky, M. M. Igumnov, A.N. Sosnin, S. G. Mashnik, R. E. Prael, M. B.

- Chadwick, T. A. Gabriel, M. Blann, "Experimental and Theoretical Study of the Yields of Radionuclides Produced in ^{209}Bi thin target Irradiated by 1500 MeV and 130MeV Protons" *Nucl.Instr. and Meth. A* 414 (1998) 73-99; Los Alamos Preprint LA-UR-97-3787; *nucl-th/9709056*.
4. P.P.Blagovolin, V.D.Kazaritsky, V.F.Batyaev, E.A.Zolotareva, E.S.Nikolaevsky, V.T.Gorshkov, V.A.Shulyndin, "Accelerator-Driven Molten-Fluoride Reactor with Modular Heat Exchangers on Pb-Bi Eutectic", *Proc. of Int. Workshop on Nucl. Methods of Transmutation of Nuclear Wastes: Problems, Perspectives, Cooperative Research*, Dubna, Russia, May 29-31, 1996, World Scientific, M.Khankhasayev, H.Plendl, Zh.B.Kurmanov (1997), pp. 235-240.
 5. V.F. Batyaev, "Neutronics and Power Deposition Parameters of the Targets Proposed in the ISTC Project 17", *Proc. of Int. Workshop on Nucl. Methods of Transmutation of Nuclear Wastes: Problems, Perspectives, Cooperative Research*, Dubna, Russia, May 29-31, 1996, World Scientific, M.Khankhasayev, H.Plendl, Zh.B.Kurmanov (1997), pp. 216-221.
 6. V.D.Kazaritsky, M.L.Okhlopkov, V.R.Mladov, A.N.Legotsky, S.S.Rozhkov, B.V.Sharov, M.M.Kats, V.V.Seliverstov, V.F.Batyaev, "A concept for a high flux spallation neutron source as a radiation damage test facility", *Nucl.Instr. and Meth. A* 414 (1998) 43-48.
 7. V.D.Kazaritsky, P.P. Blagovolin, M.L.Okhlopkov, V.R.Mladov, V.F. Batyaev, V.V. Seliverstov, E.B. Strakhov, V.I. Volk, A.Y. Vakhrushin, M.I. Zavadsky, Z.G. Ilina, S.V. Petrov, S.V. Petrin, E.F. Fomushkin, "A conceptual design study and efficiency assessment of an accelerator driven reactor system for the transmutation of nuclear waste", *Nucl.Instr. and Meth. A* 414 (1998) 21-27.

Подписано к печати 29.II.99 Формат 60x90 I/16
Усл.-печ.л. I,5. Тираж 100 экз. Заказ 470.

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