



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи
99-26

Крючков Вячеслав Петрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ
НА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСКОРИТЕЛЯХ ПРОТОНОВ
ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
АДРОННЫХ КАСКАДОВ В ВЕЩЕСТВЕ**

01.04.23 – физика высоких энергий

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 1999

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации “Институт физики высоких энергий” (г.Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.С. Барашенков, доктор физико-математических наук В.Е. Дудкин, доктор физико-математических наук Э.Е. Петров.

Ведущая организация — Московский инженерно-физический институт (технический университет) (г. Москва).

Защита диссертации состоится “___” _____ 1999 г. в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного Совета Д034.02.01 в Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, Московская обл., г. Протвино, ИФВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “___” _____ 1999 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1999

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследование закономерностей образования и распространения ионизирующих излучений — одно из важнейших направлений современной ядерной физики. Область применения результатов исследований обширна и связана как с развитием фундаментальной ядерной физики и физики частиц, так и с решением глобальных проблем развития цивилизации (энергетики, медицины, экологии).

Далеко не полный перечень проблем радиационной физики, включающий в себя задачи обеспечения радиационной безопасности персонала ядерно-физических установок и задачи подготовки и технологии проведения физического эксперимента, следующий:

- проектирование радиационной защиты;
- дозиметрия излучений;
- прогнозирование полей ионизирующего излучения как на самих ядерно-физических установках, так и за их пределами;
- прогнозирование радиационной обстановки на космических аппаратах и при высотных полетах;
- регламентация уровней излучения;
- прогнозирование фоновых условий в физическом эксперименте и выработка рекомендаций по минимизации фона;
- определение характеристик детекторов частиц;
- радиационная стойкость оборудования.

Многие прикладные области радиационной физики выделились в самостоятельные научные направления, например: в энергетике — электроядерные методы получения энергии; в медицине — лучевая терапия, лучевая томография; в экологии — радиационная экология внешней среды, пучковая трансмутация радиоактивных отходов ядерной промышленности.

Наиболее эффективно решение указанных задач и развитие перечисленных научных направлений может быть осуществлено на основе комплексного

экспериментально-теоретического подхода. В то же время, учитывая большую стоимость экспериментальных исследований, их техническую сложность и во многих случаях принципиальную невозможность на сегодняшнем уровне развития экспериментальной физики получить необходимую детальную информацию, представляется разумным в исследованиях сделать акцент на теоретические методы, тестируя результаты по наиболее достоверным экспериментальным данным.

При этом требования, предъявляемые к расчетному аппарату, должны быть следующими:

- область энергий исследуемых излучений от тепловой до 10 ТэВ для нейтронов, 10 МэВ – 10 ТэВ — для протонов и пионов;
- толщины сред, в которых изучается распространение излучения, до 100 оптических длин;
- точность рассчитываемых величин по основным функционалам не хуже 30%;
- тип частиц, учитываемых в расчетах, $n, p, \pi, K, \gamma, \mu$;
- объем информации должен включать как дифференциальные и энергии) распределения, так и интегральные.

Несмотря на то, что в последние годы достигнут значительный прогресс в развитии расчетных методов исследования переноса излучения, программ, отвечающих в полной мере всем перечисленным требованиям, сегодня в мире нет. Соответственно, отсутствуют и исследования, дающие исчерпывающий ответ на вопросы о формировании энергетического и компонентного составов излучения на ускорителях, о его дозовых характеристиках, о составе фонового излучения на экспериментальных установках на ускорителях, об адекватности показаний дозиметрических приборов в полях высокоэнергетического излучения. Также остается много неисследованных областей в проблеме взаимодействия высокоэнергетического излучения с размножающей средой.

Цель диссертации

Основной целью диссертации являются разработка расчетного аппарата, отвечающего вышеперечисленным требованиям, и проведение с его помощью расчетных исследований закономерностей образования и распространения ионизирующего излучения на высокоэнергетических ускорителях протонов, получения достаточной информации для решения задач радиационной физики, расчета радиационной защиты ускорителей и каналов частиц, определения фоновых условий в районе детектирующей аппаратуры в физических экспериментах, функций чувствительности детекторов частиц, а также исследование физических характеристик электроядерного метода производства энергии.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие методические и исследовательские задачи, определяющие в данном случае ее структуру:

1. Разработка системы константного обеспечения расчетов переноса частиц (n, p, π, γ с энергией в диапазоне: 10^{-2} эВ – 10 ТэВ для нейтронов, 10 МэВ – 10 ТэВ для заряженных частиц и 0,1 – 20 МэВ для фотонов) в веществе.

2. Разработка методов решения задачи переноса нейтральных и заряженных частиц, генерируемых под действием высокоэнергетических адронов.
3. Исследование компонентного состава, пространственных и энергетических характеристик излучения в защите.
4. Исследование закономерностей формирования полей излучения за защитой высокоэнергетического протонного ускорителя.
5. Исследование дозовых характеристик излучений высокоэнергетических ускорителей.
6. Расчетное исследование откликов детекторов частиц (дозиметров, нейтронных спектрометров).
7. Научно-прикладные исследования: проектирование радиационной защиты синхротрона и экспериментальной базы У-70, определение параметров электроядерного метода производства энергии.

Научная новизна работы определяется рядом полученных результатов, к которым относятся:

- Разработан новый алгоритм для расчета дифференциальных сечений рождения каскадных и испарительных частиц ($20 \text{ МэВ} < E < 10 \text{ ТэВ}$), позволяющий получать результаты с точностью не хуже 50%.
- Создан программный комплекс подготовки многогрупповых констант для нейтронов, протонов, пионов, каонов и фотонов, охватывающий диапазон энергий: 0,02 эВ – 10 ТэВ для нейтронов, 10 МэВ – 10 ТэВ для заряженных частиц (n, p, π, K), 0,1 – 20 МэВ для фотонов.
- Разработан программный комплекс расчета переноса нейтронов, протонов, пионов, каонов, фотонов и мюонов указанных энергий через “толстые” защиты с погрешностью не хуже 30% в одномерной геометрии методом дискретных ординат (РОЗ-400, РОЗ-6Н).
- Разработана программа MOSKIT, реализующая расчет адронного каскада методом Монте-Карло для указанных частиц и диапазона энергий.
- Исследован компонентный состав, спектральные угловые и пространственные характеристики излучения за защитами из стали, бетона, а также гетерогенными защитами сталь+бетон для геометрии боковой и торцевой защит. Установлен факт равновесия спектра в бетонной защите и его отсутствие в стальной защите.
- Предсказан эффект формирования поля излучения с доминирующим содержанием фотонов за “толстыми” гетерогенными “сталь+бетон” защитами.
- Предсказан и исследован эффект возникновения нейтронного источника на больших глубинах мюонного поглотителя высокоэнергетических адронных пучков.
- Исследованы и установлены физические закономерности формирования характеристик полей излучения вокруг ускорителей протонов с энергией до 10 ТэВ.

- Предложен и разработан метод расчета коэффициентов конверсии для определения поглощенной дозы от высокоэнергетических адронов, с высокой точностью ($\sim 20\%$) рассчитаны дозовые характеристики высокоэнергетических адронов.
- Рассчитаны с высокой точностью ($\sim 10\%$) функции чувствительности шаровых детекторов спектрометра Боннера, предложены модифицированные гетерогенные шаровые детекторы с лучшим разрешением.
- Предложен и разработан новый тип детектора высокоэнергетических адронов на основе шарового детектора с медным конвертером.

Практическая ценность

1. Разработанные параметризации для расчета дифференциальных сечений адрон-ядерных и система адронных констант могут быть использованы в большинстве современных программ расчета переноса адронов.

2. Разработанный программный комплекс может быть использован в решении практических радиационных задач на протонных ускорителях, например для проектирования радиационной защиты и расчетов ожидаемых уровней мощности дозы. На основе указанного аппарата и полученных в диссертации результатов была рассчитана и спроектирована радиационная защита высокоинтенсивных каналов ускорителя У-70, модернизирована защита ускорителя и его экспериментальной базы.

3. Полученные в ходе исследования многочисленные результаты по компонентному и спектральному составу излучения за стальной и бетонной радиационными защитами высокоэнергетических ускорителей могут быть использованы для выбора средств дозиметрического контроля и интерпретации показаний дозиметрических приборов.

4. Впервые предсказанный эффект возникновения мощного нейтронного источника в результате захвата медленных отрицательных мюонов ядрами вещества мюонных поглотителей необходимо учитывать в оценке радиационных и фоновых условий при подготовке большинства экспериментов на нейтринных каналах.

5. Предсказанный эффект формирования за “толстыми” гетерогенными защитами необычного для протонных ускорителей поля излучения с доминирующим содержанием фотонов необходимо учитывать (и учитывается в ИФВЭ) при проектировании каналов частиц и сильноточных ускорителей.

6. Разработанный и запатентованный новый тип детектора высокоэнергетических адронов на основе шарового детектора с медным конвертером внедрен в практику радиационных исследований на ускорителе У-70.

7. Рассчитанные функции чувствительности шаровых детекторов спектрометра Боннера широко используются в исследованиях нейтронных полей на ускорительном комплексе ИФВЭ.

8. Рассчитанные пространственные распределения поглощенной и эквивалентной дозы нейтронов, протонов и пи-мезонов в тканеэквивалентном фантоме предназначены для выработки регламентаций дозовых пределов для персонала, рабо-

тающего в условиях повышенного радиационного фона, в том числе и для летного состава, работающего в условиях высотных полетов.

9. Полученные в диссертации расчетные данные по взаимодействию высокоэнергетического адронного излучения с размножающей средой могут быть использованы при разработке электроядерных энергетических реакторов.

Новизна и практическая значимость некоторых разработок подтверждена:

- внедрением результатов в практику радиационных исследований;
- использованием разработанного программного аппарата и расчетных методик в проектировании радиационной защиты ускорительного комплекса ИФВЭ и других научных центров России;
- использованием результатов исследований в интерпретации показаний детекторов и дозиметров излучений на ускорителе;
- патентом на изобретение нового адронного детектора.

Значимость результатов

Совокупность результатов и положений, изложенных в диссертации, представляет собой обоснование и развитие нового перспективного направления в теоретической радиационной физике высоких энергий — исследование закономерностей распространения излучений, генерируемых высокоэнергетическими адронами, путем решения системы кинетических уравнений для нейтронов, протонов, пионов, мюонов, фотонов методом дискретных ординат.

Созданная на основе полученных в диссертации результатов радиационная защита ускорительно-экспериментального комплекса У-70 позволяет успешно выполнять научную программу на синхротроне ИФВЭ.

Предсказанный и подтвержденный эффект образования источника нейтронного излучения, образующегося в результате μ^- -захвата, и эффект формирования необычного для ускорителей поля излучения с доминирующим содержанием фотонов за “толстыми” гетерогенными защитами, углубляют наше понимание закономерностей формирования полей излучения на высокоэнергетических ускорителях.

На защиту выносятся:

1. Расчетный комплекс для численного решения многогрупповым методом задачи переноса излучения, генерируемого на высокоэнергетических ускорителях протонов, включающего в себя алгоритм и программу расчета дифференциальных сечений неупругого hA -взаимодействия, систему константного обеспечения расчетов переноса высокоэнергетических адронов, алгоритм и программу решения кинетического уравнения методом дискретных ординат для нейтрального и заряженного излучения и с учетом сильно анизотропной индикатрисы, алгоритм и новую программу, реализующую метод Монте-Карло для расчета адронного каскада в 3-мерной геометрии.

2. Новые результаты расчетного исследования характеристик (спектрального и компонентного составов) поля излучения ускорителя, формирующегося в защитах

различного химического состава и геометрии, в том числе предсказанные эффекты образования поля нейтронов в результате мю-минус захвата ядрами железа мюонного фильтра и фотонного поля за “толстыми” гетерогенными защитами сильно-точных ускорителей.

3. Новые расчетные данные по функциям чувствительности детекторов нейтронов в шаровых замедлителях разной конфигурации. Предложенный новый тип адронного радиометра.

4. Результаты расчетов дозовых характеристик низкоэнергетического ($E < 20$ МэВ) нейтронного и высокоэнергетического ($E > 20$ МэВ) адронного (n, p, π) излучения.

5. Обоснованность рассчитанной и спроектированной радиационной защиты ускорительно-экспериментального комплекса ИФВЭ.

6. Результаты расчетных исследований некоторых параметров электроядерных установок.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации докладывались на III Всесоюзной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок (Тбилиси, 1981), на VII (Дубна, 1981), VIII (Протвино, 1982), XII (Протвино, 1990), XIII (Дубна, 1992), XVI (Протвино, 1998) Совещаниях по ускорителям заряженных частиц, на V (Протвино, 1989), VI (Обнинск, 1994) и VII (Обнинск, 1998) Российских научных конференциях по защите от излучений ядерно-технических установок, на IV Европейской конференции по ускорителям ЕРАС'94 (Лондон, 1994), на 8-ой Международной конференции по нетрадиционным ядерным энергетическим системам ICENS'96, (Обнинск, 1996), на Международном симпозиуме “Численные методы решения уравнения переноса” (Москва, 1992), на 21-, 22- и 25-ом Международных симпозиумах по радиационной защите (Дрезден, 1989–1994), на научном семинаре кафедры “Радиационная физика” (МИФИ), на семинарах в Институте физики высоких энергий, одобрялись в их итоговых документах и решениях и опубликованы в работах [1–40].

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитируемой литературы из 40 наименований. Объем диссертации 310 страниц, включая 221 рисунок и 22 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, рассмотрены общие проблемы, связанные с распространением высокоэнергетического излучения в конденсированной среде, сформулирована цель работы, заключающаяся в проведении расчетных исследований полей ионизирующих излучений на высокоэнергетических протонных ускорителях и в решении следующих конкретных радиационно-физических задач:

- определение параметров ослабления излучений высокоэнергетических ускорителей в различных материалах и геометриях;
- расчет компонентного и спектрального составов излучения, генерируемого пучками протонов в мишенях и за радиационными защитами;
- расчет дозовых характеристик адронов всего спектра энергий, характерного для протонных ускорителей;
- расчетное исследование характеристик фона на детекторы частиц в экспериментах на высокоэнергетических ускорителях;
- изучение функций отклика нейтронных дозиметров;
- расчет параметров энергетической электроядерной установки;
- расчет и проектирование радиационной защиты экспериментальной базы и ускорителя У-70.

Показана необходимость создания адекватного расчетного аппарата. Сформулированы основные задачи исследования. Приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту. Дано краткое содержание диссертации по разделам.

В **первой главе** представлен краткий литературный обзор основных моделей и методов расчета неупругих адрон-ядерных реакций в области высоких энергий. Показано, что наиболее сложным энергетическим диапазоном для описания дифференциальных сечения является область 20 МэВ – 10 ГэВ. Несмотря на наличие фундаментальных моделей (каскадно-испарительной и каскадно-экситонной) для описания $d^2\sigma/dEd\Omega$ в указанной области, их использование в сеточных методах расчета переноса адронов практически невозможно, что связано с большими затратами времени на расчеты с их помощью и не пригодным для использования в численных методах решения кинетического уравнения эксклюзивной формы сечений.

Из проведенного обзора исследований и методов расчета переноса высокоэнергетических излучений в веществе следует, что практически все расчетные исследования проводились методом Монте-Карло, который не позволяет решать широкий круг задач радиационной физики на ускорителях, связанных с проблемой “глубокого проникновения”. Сформулирована задача исследований, заключающаяся в разработке программно-математического аппарата для расчета переноса высокоэнергетического излучения, включающего в себя константное обеспечение расчетов и реализующего метод дискретных ординат, и собственно исследования энергетических, пространственных и дозовых характеристик излучения на ускорителях протонов на высокие энергии.

Вторая глава посвящена изложению программного комплекса для подготовки констант, необходимых для расчета переноса излучений, генерируемых на ускорителях.

Разработанный в диссертации метод для расчета дваждыдифференциальных инклюзивных сечений в области энергий 20 МэВ – 10 ГэВ основан на аппроксимации большого экспериментального и теоретического материала по дифферен-

циальным сечениям в рассматриваемой энергетической области, накопленного за последние годы, и позволяет провести систематику экспериментальных данных практически без привлечения модельных представлений. Метод позволяет получать результат с погрешностью не хуже 50%. В основе разработанной аппроксимации дваждыдифференциальных сечений взаимодействия адрона h_1 с ядром A с выходом адрона h_2 и других продуктов ядерной реакции X ($d^2\sigma/dEd\Omega^{h_1A \rightarrow h_2X}$) в области энергий $E > 20$ МэВ лежит его представление в виде

$$d^2\sigma/dEd\Omega = (d^2\sigma/dEd\Omega)_e + (d^2\sigma/dEd\Omega)_c + (d^2\sigma/dEd\Omega)_s + (d^2\sigma/dEd\Omega)_{qe}, \quad (1)$$

где индексами обозначены дифференциальные сечения образования следующих частиц: e -испарительных, c -каскадных, s -ливневых, qe -частиц квазисвободного рассеяния.

Дваждыдифференциальные сечения образования испарительных и каскадных частиц аппроксимируются формулой вида

$$\frac{d^2\sigma}{dEd\Omega} = \frac{1}{E_0} \exp\left[\sum_i \left(\sum_j \alpha_{ij} \theta^{j-1}\right) \ln^{i-1}\left(\frac{\beta E}{E_0}\right)\right], \quad (2)$$

где E_0 — энергия налетающего адрона, θ — угол рассеяния, a_{ij} — коэффициенты.

В основе выбранной формы аппроксимации (2) лежат закономерности, полученные на основе анализа поведения дифференциальных сечений:

- в безразмерных переменных $x = E/E_0$ форма каскадной и испарительной частей дифференциальных сечений слабо зависит от энергии первичной частицы;
- при фиксированном значении угла дваждыдифференциальное сечение достаточно хорошо аппроксимируется полиномом 3-го порядка по энергетической переменной.

Коэффициенты аппроксимации (2) a_{ij} находятся методом наименьших квадратов на базе данных, рассчитанных по каскадно-испарительной и каскадно-экситонной моделям (по алгоритмам, разработанным в ОИЯИ под руководством Барашенкова В.С.), а также экспериментальных данных, накопленных в базах RD и САДКО. Множители α и β формулы (2) рассчитывается путем нормировки на экспериментальные значения коэффициента неупругости и множественности вторичных каскадных и испарительных частиц.

Для аппроксимации ливневой части дваждыдифференциальных сечений (1) используется феноменологический подход, предложенный С.И. Стригановым, основанный на факторизации сечений неупругого hA взаимодействия (дваждыдифференциального $d^2\sigma^{h_1A \rightarrow h_2X}/dEd\Omega$) и отношения сечений на ядре и на протоне $R^{h_1A \rightarrow h_2X}$:

$$\frac{d^2\sigma^{h_1A \rightarrow h_2X}}{dEd\Omega} = \frac{\sigma_{in}^{h_1A}}{\sigma_{in}^{h_1p}} R^{h_1A \rightarrow h_2X}(E_0, E, \vartheta) \frac{d^2\sigma^{h_1p \rightarrow h_2X}}{dEd\Omega}, \quad (3)$$

здесь $\sigma^{h_1A}, \sigma^{h_1p}$ — сечения неупругих hA - и hp -взаимодействий; E_0 — энергия адрона h_1 ; E, ϑ — энергия и угол адрона h_2 ; R — отношение сечений на ядре и на протоне.

Пик квазисвободного рассеяния $(d^2\sigma/dEd\Omega)_{qe}$ аппроксимируется гауссианом с параметрами, подобранными на основе экспериментальных данных.

Качество разработанных аппроксимаций иллюстрируется данными рис. 1–3, на которых приведены расчетные и экспериментальные дваждыдифференциальные сечения адрон–ядерного взаимодействия.

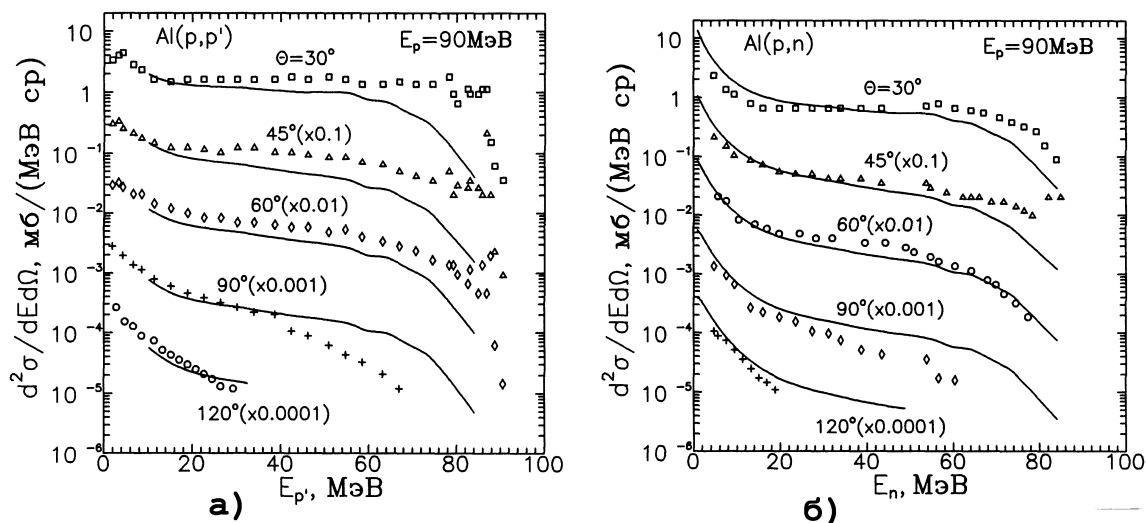


Рис. 1. Дваждыдифференциальные сечения образования протонов (а) и нейтронов (б) на ядре Al под действием протонов энергии 90 МэВ.

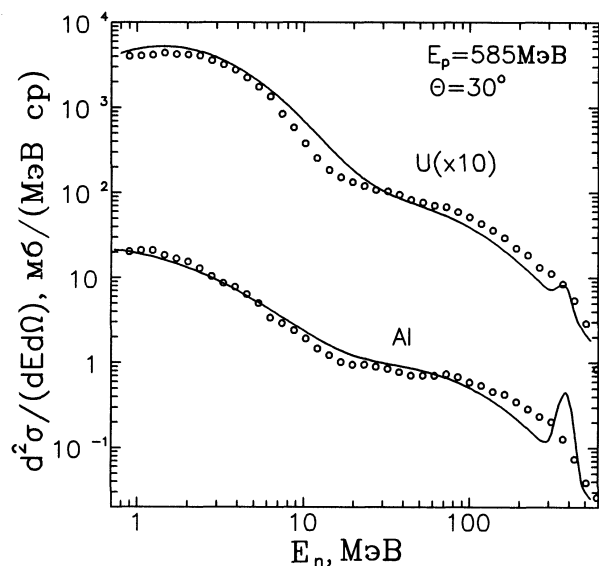


Рис. 2. Дваждыдифференциальные сечения образования нейтронов под углом 30° на ядрах Al и U под действием протонов энергией 585 МэВ. Точки — эксперимент, кривые — наши расчетные данные.

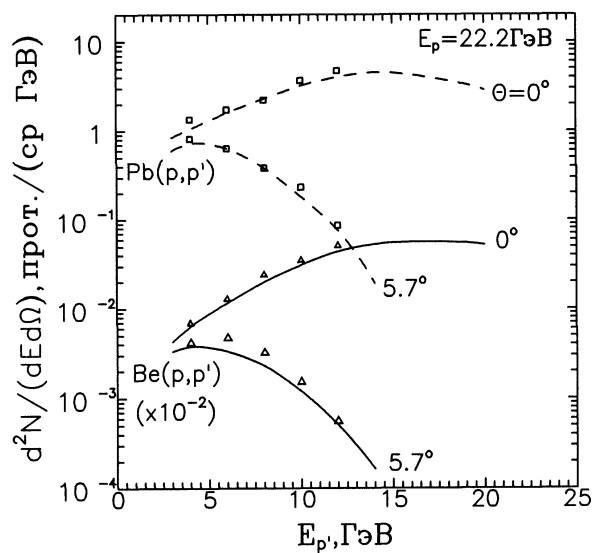


Рис. 3. Дваждыдифференциальные распределения протонов, образующихся под действием протонов энергией 22,2 ГэВ. Точки — эксперимент, кривые — наши расчетные данные.

Интегральные упругие и неупругие сечения hA -взаимодействия аппроксимируются гладкими зависимостями также на основе экспериментальных и расчетных оцененных данных, представленных в банках данных RD и САДКО, и с использованием процедуры минимизации функционала χ^2 .

Многочисленные оценки и сравнения с экспериментальными данными, некоторые из которых приведены на рис. 4, показали, что изложенная система подготовки интегральных сечений позволяет получать результаты с погрешностью $\sim 10\%$ практически для всего энергетического диапазона 20 МэВ – 10 ТэВ.

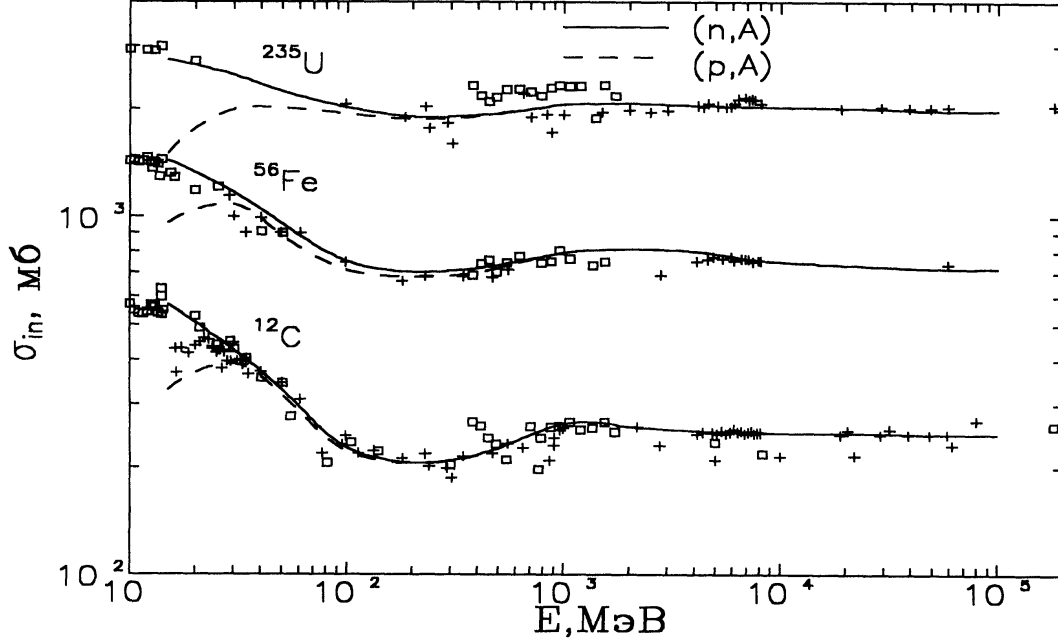


Рис. 4. Зависимость сечения неупругого адрон-ядерного взаимодействия от энергии протонов (пунктир) и нейтронов (линия) для различных ядер-мишеней. Точки — экспериментальные данные.

На основе оцененных элементарных сечений определяются следующие групповые константы, которыми в рамках многогруппового подхода характеризуется взаимодействие частицы со средой :

– микроскопическое сечение столкновения частицы q -й группы, определяемое выражением

$$\sigma_{t_i}^q = \frac{\int_{E^q}^{E^{q-1}} \sigma_{t_i}(E) \varphi_i(E) dE}{\int_{E^q}^{E^{q-1}} \varphi_i(E) dE}, \quad (4)$$

где $\varphi_i(E)$ — функция дифференциальной плотности потока частиц i -го типа; $\sigma_{t_i}^q(E)$ — микроскопическое интегральное сечение; E^q, E^{q-1} — границы q -ой энергетической группы;

– переходы из группы p в группу q , определяемые при высоких энергиях процессами рождения вторичных частиц различного сорта в неупругих hA -взаимодействиях:

$$\sigma_s^{p \rightarrow q}(\mu_s) = \frac{\int_{E^q}^{E^{q-1}} dE \int_{E^p}^{E^{p-1}} dE' \sigma_s(E' \rightarrow E, \mu_s) \varphi(E')}{\int_{E^p}^{E^{p-1}} \varphi(E) dE}, \quad (5)$$

где $\sigma_s(E' \rightarrow E, \mu_s)$ — дифференциальное сечение рассеяния; $\mu_s = \vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega}$ — косинус угла рассеяния;

– константы, определяемые из значений ионизационных потерь $\beta(E) = -dE/dx$, которые задаются для энергий, соответствующих границам групп. (Для учета потерь энергии на ионизацию в диффузионном приближении рассчитываются величины $\xi(E)$, равные среднему квадрату энергии, теряемой частицей на единице пути.)

Кроме того, для аппроксимации сильно анизотропной угловой зависимости индикатрисы и в случае использования приближения Фоккера-Планка для решения кинетического уравнения рассчитаны и представлены в библиотеке соответствующие коэффициенты.

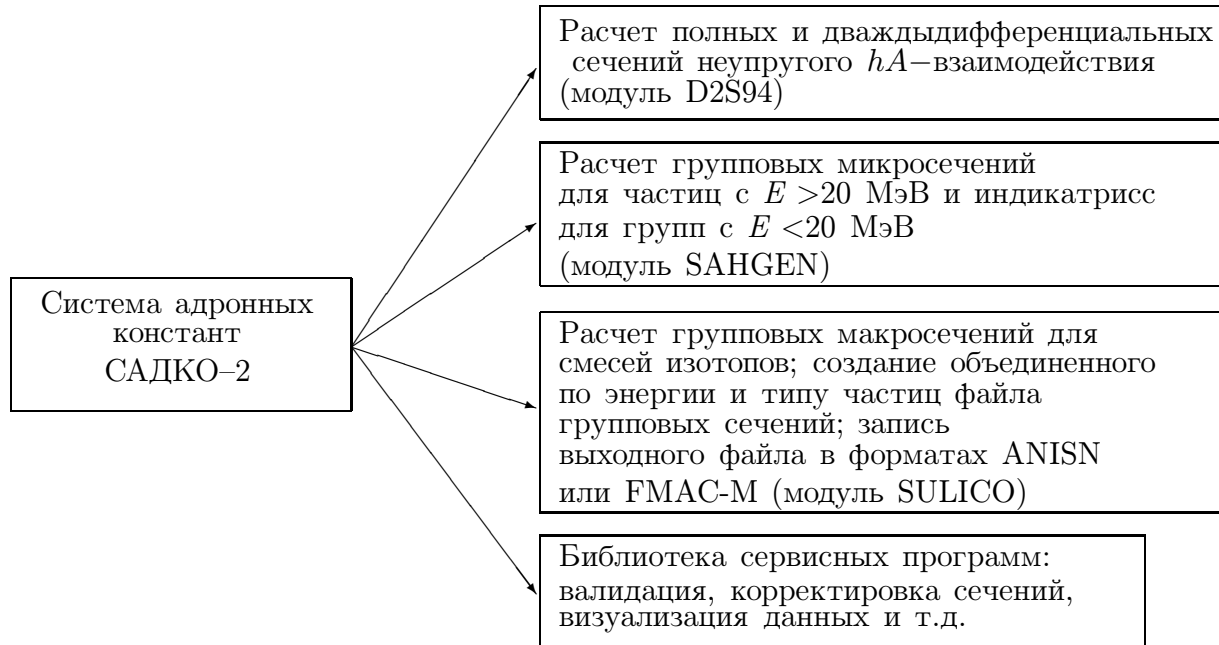


Рис. 5. Схема системы констант САДКО-2.

Представленный метод расчета групповых констант оформлен в виде программного продукта (БНД-400, САДКО-1, САДКО-2), содержащего всю необходимую для расчета дифференциальных сечений информацию и ориентированного на удобство

его использования. Система САДКО-2 осуществляет расчет полных и дифференциальных групповых макросечений для различных материалов и их смесей, а также автоматическую стыковку с низкоэнергетическими системами групповых констант. На рис. 5 представлена схема разработанной константной системы.

Составные элементы константной системы представляют собой независимые блоки программ и алгоритмов, которые объединяются задачей создания файла групповых сечений в определенном формате. Этапы решения этой задачи и определяют структуру САДКО:

- расчет полных и дваждыдифференциальных сечений неупругого hA -взаимодействия для заданного изотопа и энергетического диапазона;
- выбор оптимального числа энергетических групп и рационального способа усреднения сечений, расчет групповых микросечений и индикатрисы для изотопа в области энергий протонов, нейтронов, пионов выше 20 МэВ и вероятностей переходов в группы для нейтронов с энергией ниже 20 МэВ;
- подготовка низкоэнергетического файла групповых сечений взаимодействия нейтронов и фотонов с веществом для расчетной композиции;
- создание объединенного по типу частиц и энергии файла групповых макросечений.

Угловая зависимость индикатрисы представляется разложением в ряд либо по полиномам Лежандра, либо в точках по μ_s .

Для энергий ниже 20 МэВ в САДКО-2 используется групповая структура и ядерные данные библиотеки нейтронных и фотонных сечений БВФ.

Результатом работы константной системы САДКО-2 является файл групповых сечений в определенном формате, подготовленный с учетом компонентного состава вещества защиты или детектора, включающий в себя как высокоэнергетические, так и низкоэнергетические ($E < 20$ МэВ) групповые константы. Порядок следования групп для частиц различного сорта оптимизируется с целью минимизации числа внешних и внутренних итераций при решении задачи переноса.

Разработанный аппарат предназначен для осуществления константного обеспечения расчетов групповыми методами переноса протонов и пионов в диапазоне энергий 20 МэВ – 10 ТэВ, нейтронов — от тепловой до 10 ТэВ, для фотонов — от 0.01 до 15 МэВ, и может быть использован в программах реализующих как численные решения кинетических уравнений, так и метод Монте-Карло.

В третьей главе излагаются подходы и алгоритмы решения задачи переноса излучений (нейтронов, протонов, фотонов, пионов), генерируемых на высокоэнергетических ускорителях, в конденсированной среде.

Для решения большого класса задач переноса высокоэнергетического излучения, недоступных для метода Монте-Карло, в диссертации развиваются сеточные методы решения кинетического уравнения Больцмана для плотности потока излучения $\psi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ с энергией E в точке \vec{r} , распространяющегося в направлении $\vec{\Omega}$, которое в общем виде записывается, как:

$$(\vec{\Omega}\vec{\nabla})\psi^i = Q_V^i(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) + I_{cm}^i, \quad (6)$$

с соответствующими граничными условиями. Здесь $Q_V^i(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ — плотность объемных источников; I_{cm}^i — интеграл столкновений, определяемый выражением

$$I_{cm}^i(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) = -\Sigma_{tot}^i(\vec{r}, E)\psi^i(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) + \sum_j \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' \int_0^\infty dE' \psi^j(\vec{r}, \vec{\Omega}', E') \Sigma_s^{j \rightarrow i} \left(\frac{E' \rightarrow E}{\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}} \right), \quad (7)$$

Σ_{tot}^i — полное сечение взаимодействия; $\Sigma_s^{j \rightarrow i} \left(\frac{E' \rightarrow E}{\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}} \right)$ — дифференциальное сечение рассеяния из состояния $(E', \vec{\Omega}')^j$ в состояние $(E, \vec{\Omega})^i$; i, j — индексы сорта частиц.

Показано, что основными проблемами, возникающими при решении уравнения переноса высокоэнергетического нейтрального и заряженного излучения (6) сеточными методами, являются аппроксимация интеграла столкновений с учетом сильно анизотропной индикатрисы и оператора, описывающего сброс энергии заряженной частицей в электромагнитных взаимодействиях.

Основная идея предложенного и разработанного метода решения уравнения (6) заключается в представлении ядерных составляющих индикатрисы рассеяния и интеграла столкновений в виде суммы регулярных и сингулярных частей:

$$\Sigma_{s_{яд}} = \Sigma_{s_{яд}}^{sing} + \Sigma_{s_{яд}}^r, \quad (8)$$

$$I_{яд} = I_{яд}^{sing} + I_{яд}^r, \quad (9)$$

где $\Sigma_{s_{яд}}^{sing}$ — сингулярная часть сечения, отличная от нуля лишь в окрестности $\mu_s=1$ ($\mu_s = \vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega}$ — косинус угла рассеяния), а $\Sigma_{s_{яд}}^r$ — регулярная часть, которая представляет собой “гладкую” функцию угла и может быть аппроксимирована с хорошей точностью небольшим числом первых моментов разложения по полиномам Лежандра.

Разлагая произведение $\psi \Sigma_s$ в ряд по косинусу угла μ_s и удерживая первые два члена, с учетом слабой зависимости (по сравнению с индикатрисой) $I_{яд}^{sing}$ от угла, получаем для $I_{яд}^{sing}$ выражение, точно совпадающее с членом Фоккера-Планка:

$$I_{яд}^{sing} = \frac{T}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left((1 - \mu^2) \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right), \quad (10)$$

$$T = 2\pi \int_{-1}^1 \Sigma_s^{sing}(\mu) (1 - \mu) d\mu. \quad (11)$$

Для некоторых допустимых приближений сечений упругого и неупругого ядерных hA -взаимодействий получен явный вид коэффициентов Фоккера-Планка T :

$$T = \sum_i a_i (2 - b_i \pi / 2), \quad (12)$$

где a_i и b_i — коэффициенты, определяемые из стандартных параметризаций сечений упругих и неупругих hA -взаимодействий, суммирование по i осуществляется по всем типам взаимодействий.

Разработанный подход позволяет описывать процессы с большой передачей энергии в рамках обычных численных схем решения кинетического уравнения Больцмана, а процессы с незначительными изменениями начальной энергии и направления движения частиц, характерные для лидирующей части спектра адронов, — в приближении Фоккера-Планка. Предложен и реализован в программе РОЗ400 алгоритм шаговой аппроксимации оператора кинетического уравнения, отвечающего за ионизационное торможение заряженных частиц. (Численные схемы более высокого порядка точности успешно разрабатываются Гермогеновой Т.А. и Волощенко А.М. в Институте прикладной математики.)

Для повышения точности численного решения кинетического уравнения для заряженных частиц разработан алгоритм расчета члена, описывающего нерассеянный компонент излучения в приближении непрерывного замедления. Суть алгоритма заключается в получении численного решения балансных уравнений для нерассеянного излучения в разностных ячейках, расположенных вдоль характеристик, определяемых из решения уравнения

$$\mu \frac{\partial E}{\partial x} = -\beta(x, E). \quad (13)$$

В диссертации получен явный вид характеристики для нерассеянного заряженного компонента (13), используя который можно определить источник первого столкновения в каждой ячейке фазового пространства. Предложенный алгоритм реализован в программе РОЗ-6Н при расчете переноса заряженных частиц (протонов, пионов, мюонов).

Для решения задач переноса излучения в 3-мерной геометрии разработана новая программа MOSKIT, реализующая метод Монте-Карло. Модификация предложенного алгоритма, отличающая его от традиционно принятого в подобных высокоэнергетических программах, состоит в идее использования сеточных методов для расчета характеристик частиц, т.е. траектории частиц моделируются в фазовом пространстве $(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, I)$, где переменные $\vec{\Omega}, E, I$ принимают только дискретные значения. Вероятности переходов из одной ячейки дискретного фазового пространства (p, i, k, z) , характеризуемой типом частицы (i), номером энергетической группы (p), номером углового интервала (k'), номером физической зоны (z), в другую с соответствующими индексами (p', i', k', z) описываются матрицей, элементы которой

$$P(p, p', i, i', k, z) = \Sigma(p, p', i, i', k', z) / \Sigma_i(i, z) \quad (14)$$

нормированы на полную множественность частиц, образующихся во взаимодействии первичной частицы i -го сорта, имеющей энергию в группе p , в физической зоне с номером z :

$$M(p, i, z) = \sum_{i'}^I \sum_{k'}^K \sum_{p'}^P P(p, p', i, i', k', z). \quad (15)$$

Для достижения наилучшей эффективности выборки характеристик частиц в алгоритме программы предусмотрена предварительная подготовка матриц интегральных распределений вероятностей переходов, элементы которой определяются суммированием элементов матрицы переходов (15) по соответствующим индексам, например:

$$P(p, i, i', z, k|q < Q) = \sum_{q=1}^Q P(p, i, i', z, k|q). \quad (16)$$

Выборка характеристик частицы при этом осуществляется из условия

$$P(p, i, i', z, k|q < Q - 1) < \xi < P(p, i, i', z, k|q < Q), \quad (17)$$

где ξ – равномерно распределенное на отрезке 0–1 случайное число.

Использование матриц интегральных распределений вероятностей переходов (14)–(16) и условия (17) позволяет значительно увеличить быстродействие программы по сравнению с ее аналогами.

Программа MOSKIT использует в качестве константной системы библиотеку САДКО-2.

В четвертой главе проводятся исследования характеристик излучения — компонентного состава, спектрального и пространственного распределений. С целью тестирования разработанного программного комплекса в диссертации проведено большое количество сравнений с экспериментальными данными и результатами расчетов, которые проводились по лучшим мировым программам, реализующим метод Монте-Карло MCNP (для нейтронов с $E < 40$ МэВ) и FLUKA92 (для нейтронов, протонов и мезонов), а также метод дискретных ординат, реализованный для расчета транспорта нейтронов с $E < 20$ МэВ в программе ANISN (рис. 6–8).

Сравнения данных, полученных с помощью вышеописанного комплекса РОЗ-6Н + САДКО-2, с расчетными данными MCNP + ENDF/B-5 показали хорошее согласие как по пространственным, так и по спектральным распределениям флюенса нейтронов в железной защите для небольших энергий нейтронов источника 2, 14 МэВ. Значительно хуже согласие с нашими данными расчетов по MCNP + “расширенная библиотека” для энергии источника 40 МэВ, которые также противоречат данным для энергий 2, 14 МэВ.

Сравнения расчетных данных в области средних энергий ($E < 400$ МэВ) с данными, полученными по программному комплексу ANISN + HILO (рис. 7), свидетельствуют о хорошем согласии на небольших толщинах и неудовлетворительном согласии на больших. Проведенный в диссертации анализ показал, что основной причиной расхождений в обоих случаях является неточность в константном обеспечении (в первом случае неточности в “расширенной библиотеке”, опирающейся на ENDF/B-4, во втором случае – в библиотеке HILO, также основанной на ENDF/B-4).

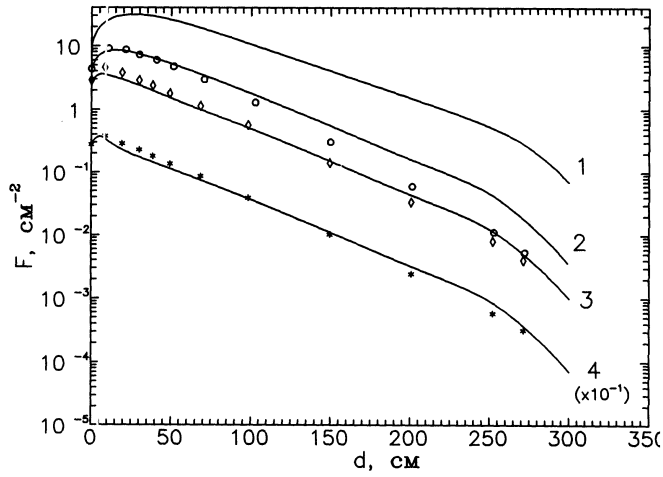


Рис. 6. Изменение полного флюенса нейтронов по глубине железной защиты в зависимости от энергии первичного нейтрона. Кривые — расчет по РОЗ6Н+САДКО2; точки — MCNP+ENDF/B-5(4).

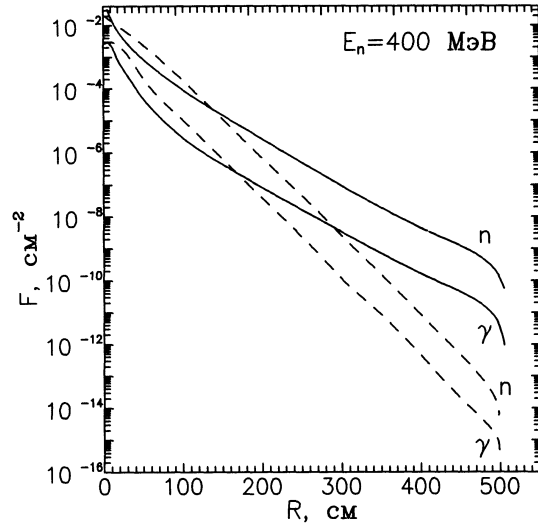


Рис. 7. Изменение полного флюенса нейтронов и фотонов по радиусу железной сферы для нейтронного источника энергией 400 МэВ. Сплошные кривые — РОЗ6Н + САДКО2, пунктирные — ANISN + HILO.

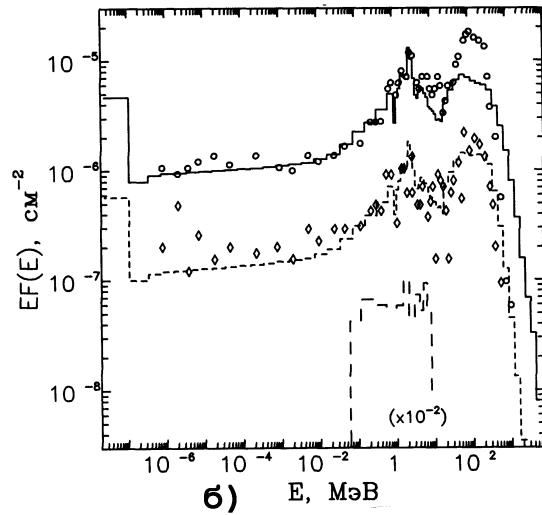
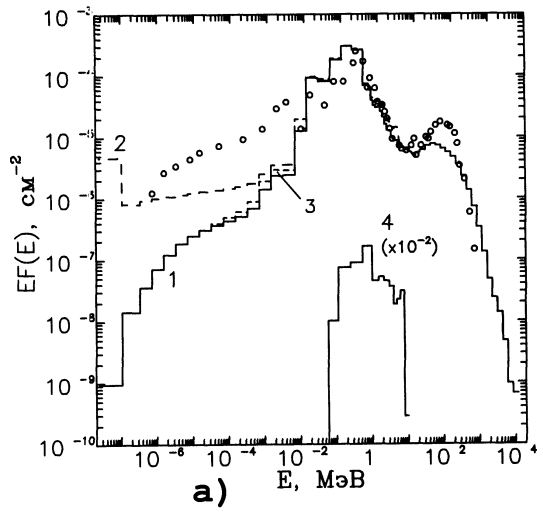


Рис. 8. Спектры частиц за защитой пучка частиц энергией 204 ГэВ, падающего на медную мишень толщиной 5 см: а) защита из железа толщиной 40 см; б) защита из бетона толщиной 80 и 160 см. Гистограммы — расчет по РОЗ6Н+САДКО2. Точки — расчет по программе FLUKA92.

Сравнения результатов расчетов переноса высокоэнергетического излучения (200 ГэВ), полученного с помощью комплекса РОЗ-6Н + САДКО-2 и методом Монте-Карло по программе FLUKA-92 (рис. 8.), показали, что:

- согласие спектров нейтронов за бетонной защитой хорошее, за железной удовлетворительное;
- согласие спектров заряженных частиц протонов и пионов значительно хуже;
- коэффициенты “жесткости”, рассчитанные по разным программам, находятся в разумном согласии;
- отношение флюенса протонов к флюенсу высокоэнергетических нейтронов, рассчитанное по комплексу РОЗ6Н+САДКО-2, составляет 5% для железной защиты и 10% для бетонной, что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В целом, проведенные сравнения результатов расчетов по программному комплексу РОЗ-6Н + САДКО-2 и MOSKIT с экспериментальными и литературными расчетными данными, анализ имеющихся расхождений показали высокую надежность и точность разработанного программно-алгоритмического аппарата, основанного на сеточном методе для аппроксимации угловой зависимости и групповом подходе для энергетической.

Изучены пространственные и энергетические распределения нейтронов и фотонов в одномерной защите из железа, свинца, бетона, воды, полиэтилена, а также в гетерогенных защитах, с радионуклидным источником нейтронов Cf^{252} на границе.

Представлены многочисленные рассчитанные пространственные и спектральные распределения нейтронов, протонов, π -мезонов и фотонов в бетонных и железных защитах высокоэнергетических ускорителей.

Расчетные исследования с помощью разработанного и изложенного выше аппарата позволили ответить на многие принципиальные и крайне важные вопросы о компонентном и спектральном составе излучения, формируемого в защитах разного химического состава и геометрии.

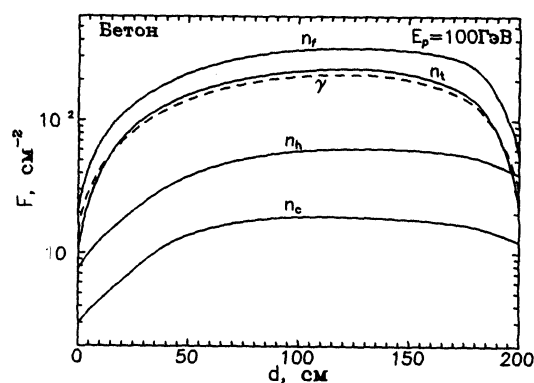


Рис. 9. Изменение полного флюенса различных компонентов излучения по глубине бетонной защиты.

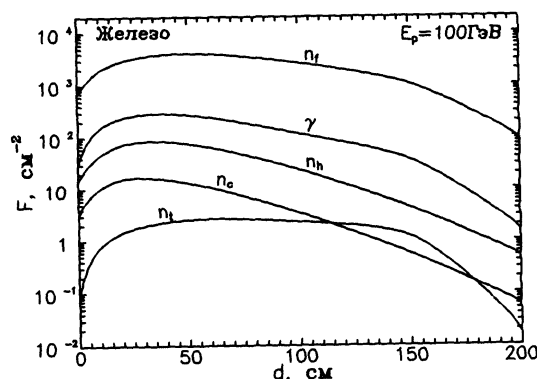


Рис. 10. Изменение полного флюенса различных компонентов излучения по глубине железной защиты.

Показано наличие равновесия между высокоэнергетическими и низкоэнергетическими компонентами излучения в бетоне, а также установление равновесного спектра в бетоне, что иллюстрируют данные рис. 9. Получены асимптотические соотношения между потоковыми компонентами излучения за бетонной защитой, слабо зависящими от энергии протонов пучка, которые составляют:

$$F_h/F_n = 0,6; \quad F_h/F_\gamma = 1,4; \quad F_h/F_c = 3,2,$$

где F_h, F_n, F_c, F_γ — флюенс высокоэнергетических адронов, нейтронов с $E < 20$ МэВ, всех заряженных частиц и фотонов соответственно.

Одновременно показано отсутствие подобного равновесия между высокоэнергетическим адронным и низкоэнергетическим нейтронным и фотонным компонентами в стальной защите (рис. 10).

Установленный в диссертации факт отсутствия в железе указанного равновесия является прямым следствием высокого значения длины релаксации нейтронов в железе, также полученного в диссертации. Это значение составляет (290 ± 10) г/см², что хорошо согласуется с экспериментальными результатами и значительно отличается от соответствующих зарубежных литературных данных. Проведенный анализ показал, что причина указанного разногласия лежит, как говорилось выше, в неточности в многогрупповой библиотеке HILO.

С указанным выше большим значением длины релаксации связаны два следующих эффекта, предсказанных и исследованных в диссертации:

- формирование поля фотонного излучения за “толстыми” гетерогенными защитами;
- формирование поля нейтронного излучения в мюонных фильтрах нейтринных каналов.

Показано, что распространенное сегодня в радиационной физике представление о двух наиболее значимых компонентах излучения за защитой протонных ускорителей, высокоэнергетического ($E > 20$ МэВ), адронного (h) и низкоэнергетического ($E < 20$ МэВ) нейтронного (n), не правомерно для случая “толстой” (с толщиной стального слоя более 400 см) гетерогенной защиты сталь+бетон. Расчеты показали, что образующиеся в реакции $Fe(n\gamma)$ в железном слое фотоны практически полностью определяют дозу излучения за защитой указанной геометрии, создавая уникальное для ускорителей поле излучения с доминирующим содержанием фотонов. Это иллюстрируется данными рис. 11, на котором представлено распределение флюенса всех рассматриваемых компонент излучения по глубине плоской гетерогенной сталь+бетон защиты с источником протонов с $E = 10$ ГэВ на границе.

Указанный эффект важен как для проектирования радиационной защиты сильноточных пучков и ускорителей, так и для разработки калориметрических детекторов частиц. В диссертации предложены оптимальные композиции радиационной защиты: трехслойная — сталь+бетон+сталь; и четырехслойная — сталь+бетон+сталь+бетон.

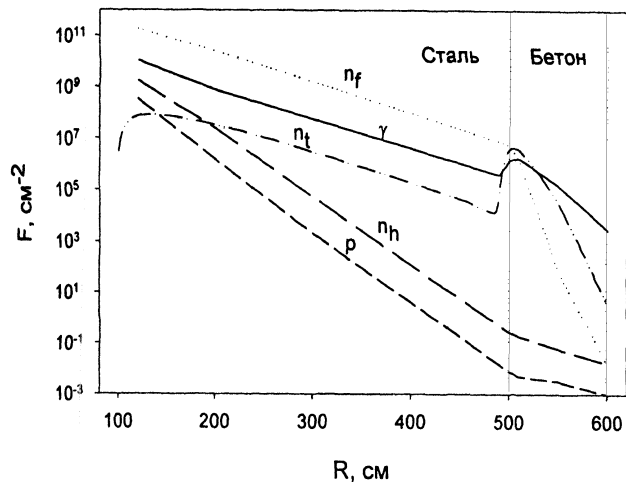


Рис. 11. Распределение флюенса высокоэнергетических адронов, нейтронов, и фотонов по глубине гетерогенной защиты “сталь+бетон”. Источник — протонный пучок энергией 3 ГэВ на границе.

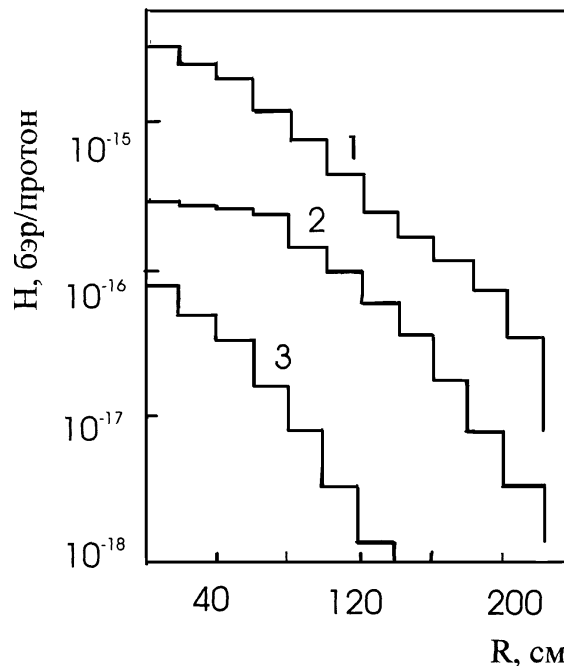


Рис. 12. Радиальное распределение мощности эквивалентной дозы нейтронов μ^- захвата в железном μ^- -фильтре ν -канала Серпуховского синхротрона для режимов работы: фокусировка ν (1), без фокусировки (2), beam-dump (3).

Предсказанный в диссертации эффект формирования поля нейтронного излучения в мюонных поглотителях высокоэнергетических адронных пучков состоит в следующем. Любой адронный пучок, сформированный после взаимодействия протонного пучка с мишенью, имеет мощное мюонное сопровождение. Отрицательные мюоны, образующиеся в распаде π^- - и K^- -мезонов пучка, высаживаются на стальной мюонный поглотитель, замедляются в электромагнитном взаимодействии до тепловой энергии и с вероятностью 90% поглощаются ядрами вещества поглотителя. Возбуждение остаточного ядра снимается “испарением” нейтронов и фотонов. Нейтроны со спектром, близким к спектру деления, очень слабо ослабляясь в стали (о длине релаксации см. выше), распространяются за пределы мюонного фильтра. В результате на железном мюонном фильтре в районе поглощения мюонов образуется мощный источник нейтронов, который определяет уровни мощности дозы и фон на экспериментальные установки.

Расчетные распределения флюенса нейтронов по радиусу мюонного фильтра для трех разных режимов работы нейтринного канала (фокусировка нейтрино, фокусировка антинейтрино и режим “beam dump”) приведены на рис. 12.

Из приведенных данных, в частности, следует, что при работе нейтринного канала Серпуховского ускорителя с интенсивностью $5 \cdot 10^{13}$ п/ц в режиме фокусировки отрицательных частиц на поверхности мюонного поглотителя на расстоянии 12 м от его начала уровни мощности дозы, определяемые низкоэнергетическими нейтронами μ^- -захвата, будут в ~ 50 раз превышать предельно допустимые; практической рекомендацией является экранировка железного мюонного поглотителя бетонной защитой на протяжении 18 м.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию пространственных характеристик поля излучения в типичных геометриях “источник – защита” на высокоэнергетических ускорителях протонов. Рассмотрено формирование поля излучения вокруг открытых мишеней, за радиационной защитой мишеней станций и трактов транспортировки пучков, в защитных лабиринтах, а также формирование рассеянного в атмосфере излучения вокруг ускорителя.

Мишень является основным элементом практически всех экспериментальных установок на ускорителе. Сброс пучка ускоренных частиц на мишень приводит к образованию мощного локального источника вторичного излучения, определяющего дозовые нагрузки на окружающее оборудование и поле излучения, представляющего опасность для персонала. Этим и вызвана необходимость проведенного в диссертации исследования формирования поля излучения вокруг мишеней и разработанная аппроксимация его основных характеристик.

Исследования поля излучения вокруг мишеней проводились с помощью программного комплекса MOSKIT + САДКО-2. Изучались угловые распределения флюенсов основных компонентов излучения, эквивалентной и поглощенной доз в зависимости от материала мишени, ее толщины и энергии протонов пучка, которая менялась в диапазоне 50 МэВ – 600 ГэВ. На основе анализа расчетных данных по угловым распределениям от мишени флюенса и дозы излучения предложена параметризация, определяющая значения искомым функционалов $F^i(\theta)$ (i -того типа) для направления θ от оси пучка на расстоянии R от мишени:

$$F^i(\theta) = \epsilon(\alpha_1^i + \alpha_2^i \theta^{-\alpha_3^i})/R^2, \quad (18)$$

где ϵ — эффективность мишени; $\alpha_{1,2,3}^i$ — параметры аппроксимации. Параметры $\alpha_{1,2,3}^i$ рассчитаны в зависимости от энергии и приведены в диссертации. Для энергии $E_p = 70$ ГэВ и для “тонкой” железной мишени и для расчета эквивалентной дозы они составляют: $\alpha_1^i = 1,210^{-8}$; $\alpha_2^i = 1,210^{-5}$; $\alpha_3^i = 1,86$

Предложенная параметризация позволяет рассчитывать указанные функционалы с погрешностью не хуже 20–30%, что иллюстрируется данными рис. 13, на котором приведено угловое распределение дозы, рассчитанное с помощью аппроксимации (18) в сравнении с экспериментальными результатами.

Для определения поля излучения за защитой в типичной для ускорителя геометрии мишени, расположенной в туннеле (указанная геометрия характерна также и для встречных р-р-пучков), проведены расчетные исследования и анализ пространственных распределений флюенса излучения. На основании многочисленных

расчетных данных, используя параметризацию углового распределения (18), продольное вдоль оси пучка (z) распределение флюенса (дозы) излучения было аппроксимировано формулой

$$F^i(z, t) = \epsilon(\alpha_1^i + \alpha_2^i \theta^{-\alpha_3^i}) \frac{\beta \bar{E}(\theta) \text{Sin}^3(\theta)}{z^2} G(t, \bar{E}), \quad (19)$$

где $\theta = \text{arctg}(R/z)$, R — радиус туннеля; $\bar{E}(\theta)$ — средняя энергия спектра высокоэнергетических адронов под углом θ к мишени; β — параметр; $G(t, \bar{E})$ — функция ослабления излучения от плоского мононаправленного источника адронов; t — толщина защиты. Степень достоверности аппроксимации (19) видна из рис. 14, на котором приведены расчетное и экспериментальное распределения флюенса высокоэнергетических адронов за защитой мишени, на которую сбрасывается пучок протонов с энергией 70 ГэВ.

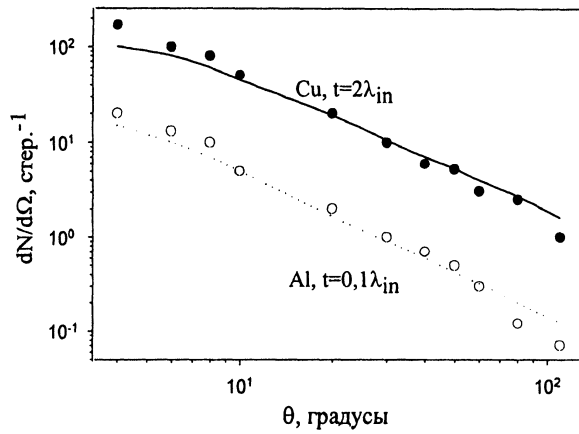


Рис. 13. Угловое распределение флюенсов адронов ($E > 20$ МэВ) вокруг “толстой” медной и “тонкой” алюминиевой мишеней. Кривые — наш расчет, точки — литературные экспериментальные данные.

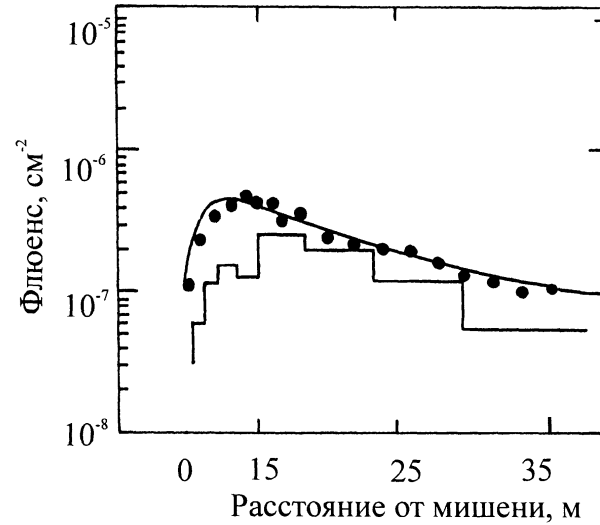


Рис. 14. Распределение флюенса адронов с $E > 20$ МэВ за верхней защитой нейтринного канала при сбросе пучка протонов 70 ГэВ на мишень. Кривая — наш расчет; гистограмма — расчет методом Монте-Карло; точки — экспериментальные данные.

Для случая равномерно распределенных по тракту транспортировки пучка потерь (\bar{L}), что имеет место практически на всем протяжении ускорителя и выведенного пучка, и на основании анализа расчетных данных получено выражение, описывающее флюенс (дозу) излучения за защитой с точностью не хуже 40%:

$$F^i(t) = \frac{\bar{L}(0,87E_0 + 0,656)G(t, E_0)}{R + t}. \quad (20)$$

В случае расчета флюенса высокоэнергетических адронов в формулах (20) следует принимать

$$G(t, E_0) = \exp(-t/\lambda(E_0)). \quad (21)$$

Для общего случая зависимости $G(t, E_0)$ и $\lambda(E_0)$ от энергии рассчитаны и представлены в диссертации.

На больших расстояниях $R > 10$ м от источника излучения мощность дозы практически полностью определяется нейтронами, рассеянными на ядрах атмосферного воздуха (эффект sky-shine). На основании проведенного в диссертации расчетно-экспериментального исследования эффекта sky-shine на Серпуховском синхротроне показано, что закономерности формирования поля рассеянного излучения определяются энергетическим распределением нейтронов утечки через защиту ускорителя.

Для прогнозирования поля рассеянного излучения вокруг проектируемых ускорителей или новых каналов предложена параметризация, связывающая флюенс (дозу) с расстоянием от источника, интенсивностью пучка, эффективностью мишени, длиной ослабления флюенса (дозы), средней энергией спектра нейтронов источника. Рассчитаны и представлены зависимости значений параметров от энергии пучка и средней энергии спектра источника.

Показано, что наличие за щитами большинства ускорителей мира двух основных групп спектров нейтронов: “жестких” — за бетонной или грунтовой щитами (средняя энергия $E \sim 40\text{--}70$ МэВ), и “мягких” — за железной ($E \sim 0,5\text{--}2$ МэВ), обуславливает два значения длин ослабления, соответствующих этим спектрам: $\lambda_h = 610 - 640$ м; $\lambda_s = 180 - 200$ м.

В шестой главе изучаются дозовые характеристики излучения, генерируемые на высокоэнергетических ускорителях.

Главной характеристикой радиационного воздействия ионизирующего излучения на вещество является поглощенная доза. Степень биологической опасности, величина радиационных нагрузок на оборудование и детекторы частиц, другие радиационные эффекты характеризуются значением поглощенной дозы. Мощность поглощенной дозы нейтронов с энергией менее 100 МэВ (D, Гр/с) с удовлетворительной точностью рассчитывается в керма-приближении

$$D = \int F(E)k(E)dE, \quad (22)$$

где $F(E)$ — спектр нейтронов (нейтрон см^{-2} МэВ $^{-1}$ · c^{-1}); $k(E)$ — нейтронный керма-фактор (Гр · м 2).

Керма-фактор как коэффициент перехода от флюенса частиц к поглощенной дозе весьма удобен тем, что определяется лишь свойствами ядра, и поэтому может быть рассчитан и затабулирован для каждого изотопа заранее.

Минимальная погрешность оцененных керма-факторов в области энергий ~ 50 МэВ для элементов ткани по данным многих работ составляет 20–30%, хотя

реальные погрешности, видимо, значительно выше. Кроме того, погрешности растут с ростом энергии нейтронов. Поэтому уточнение нейтронных керма-факторов является важной задачей.

Расчет керма-факторов для нейтронов с энергией более 20 МэВ является серьезной проблемой, что обусловлено ростом числа каналов ядерных реакций с энергией и отсутствием детальных библиотек ядерных данных, подобных существующим для низкоэнергетической области. Поэтому для определения керма-факторов в области энергий $E < 100$ МэВ в диссертации была использована гибридная модель, разработанная Бланном и представляющая собой комбинацию экситонной модели Гриффина и модели независимых частиц, для описания двухчастичных взаимодействий внутриядерных нуклонов. В гибридной модели, реализованной в программе ALICE, при расчетах неупругих ядерных реакций учитывается как прекомпаундная стадия, так и равновесное испарение.

Были проведены многочисленные и детальные сравнения по выходам и спектральным распределениям заряженных частиц, полностью определяющих поглощенную дозу: легких (протонов) и, особенно, тяжелых (дейтронов и α -частиц). В качестве примера на рис. 15 (а-г) приведено сравнение рассчитанных спектров альфа-частиц, испускаемых в неупругих nC -реакциях для энергий нейтронов 11, 14, 17 и 19 МэВ с экспериментальными данными. Из рисунка видно хорошее (в пределах 10–20%) согласие расчетных данных с экспериментальными для всех указанных энергий.

Полученное согласие (в пределах 10%) расчетных спектров протонов и α -частиц с экспериментальными данными позволяет считать, что керма-факторы, рассчитанные по гибридной модели, будут иметь точность также не хуже 10%. Это подтверждается прямым сравнением расчетных керма-факторов с экспериментальными, приведенным на рис. 16, на котором представлены керма-факторы для углерода.

Проведен тест правильности рассчитанных нейтронных керма-факторов по углерод-кислородному отношению R :

$$R = k_c(E)/k_o(E). \quad (23)$$

Показано, что в области энергий ($50 < E < 200$ МэВ), где вклад протонов в керму становится преобладающим, углерод-кислородное отношение можно выразить, как:

$$R = \left(\frac{A^o}{A^c} \right)^{1/3} = 1,1. \quad (24)$$

Полученное по гибридной модели углерод-кислородное отношение, равное 1,06, находится в хорошем согласии с экспериментальными данными, равными $1,1 \pm 0,1$, а также с предсказаниями по формуле (24).

Рассчитанные и приведенные в диссертации данные позволяют рассчитывать поглощенную дозу от нейтронов с энергией в диапазоне 15–150 МэВ.

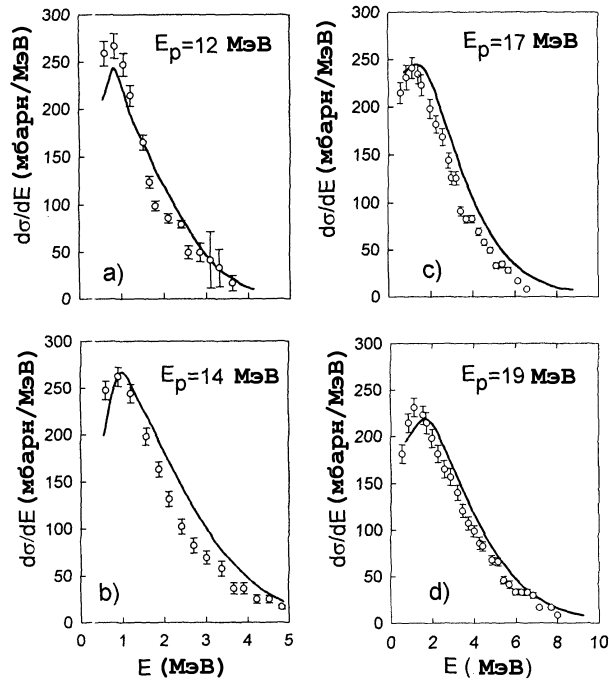


Рис. 15. Спектры α -частиц в nC -реакции. Кривые — расчет по гибридной модели; точки — эксперимент.

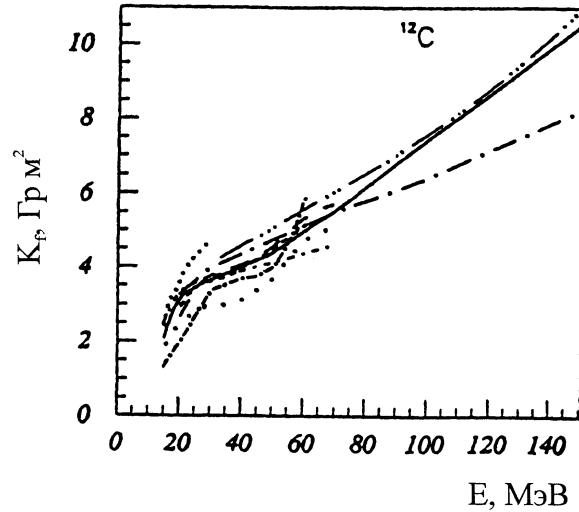


Рис. 16. Керма-фактор для углерода. Сплошная кривая — наш расчет; прерывистые кривые — литературные данные.

Использование вышеприведенных керма-факторов для нейтронов для расчета поглощенной дозы возможно лишь при условии равновесия заряженных частиц. Такое равновесие для частиц с энергией более 100 МэВ на практике выполняется достаточно редко. Поэтому был предложен, разработан и реализован метод расчета коэффициентом конверсии поток-поглощенная доза для нейтронов, протонов и пионов, используемых для расчета поглощенной дозы от адронов с энергией до 1000 ГэВ.

Коэффициент конверсии поток-поглощенная доза для всех адронов с энергией $E > 20$ МэВ ($k'_n(E)$) определяется в диссертации как сумма начальных кинетических энергий всех заряженных частиц, поглощенных в окрестности точки рождения, всех тяжелых заряженных ($A > 1$) частиц, рожденных в неупругих и упругих hA -взаимодействиях, низкоэнергетических протонов и пионов ($E < 20$ МэВ), а также электронов, образующихся в процессах ионизации среды, освобожденных под действием единичного флюенса адронов в веществе единичной массы, и выражается

$$\begin{cases} k'_1(E) = \sigma_{el} N E_{el} + \sigma_{non} N \sum_j E'_j, & \text{для нейтронов} \\ k'_2(E) = \sigma_{el} N E'_{el} + \sum_j \sigma_{non} E'_j + \frac{1}{\rho} (dE/dx), & \text{для протонов} \\ k'_3(E) = T/\rho l_{ion}, & \text{для } p, \pi^+, K^\pm; \\ k'_4(E) = (T + E_\pi)/(\rho l_{ion}), & \text{для } \pi^-. \end{cases} \quad (25)$$

Здесь σ_{el} — сечение упругого рассеяния; E_{el} — средняя кинетическая энергия ядра отдачи; σ_{non} — сечение неупругого рассеяния; E'_j — средняя кинетическая энергия заряженных частиц с $A > 1$ или заряженного адрона (p, π^\pm, K^\pm) с $E < 20$ МэВ, N — число ядер в одном грамме вещества; dE/dx — линейная тормозная способность вещества; ρ — плотность вещества; T — кинетическая энергия пиона; E_π — суммарная энергия всех тяжелых фрагментов и протонов с энергией $E < 20$ МэВ, испускаемых ядром в результате захвата π^- -мезона; l_{ion} — ионизационный пробег пиона.

(Подобный подход в определении парциального керма-фактора, с отличием в отдельных его составляющих, использовался ранее А.В. Санниковым с соавторами для расчета эквивалентной дозы высокоэнергетических адронов.)

Использование определенного выше коэффициента конверсии в свертке со спектрами частиц (6) вместо обычного керма-фактора позволяет рассчитывать поглощенную дозу для всех рассматриваемых адронов и для диапазона энергий 20 МэВ – 100 ГэВ. Введенный таким образом коэффициент конверсии имеет простой физический смысл — это величина, практически совпадающая с поглощенной дозой от единичного флюенса частиц в “тонком” (толщиной $< 0,1\lambda_{in}$) слое вещества.

Коэффициент конверсии рассчитывается для области энергий 20–5000 МэВ с помощью гибридной, а также каскадно-испарительной и каскадно-экситонной моделей. Для более высоких энергий, где указанные модели не работают, предложен метод расчета коэффициента конверсии, в основе которого лежит экспериментальный факт независимости числа черных следов в ядерной фотоэмульсии от энергии первичного адрона в области высоких энергий ($E \geq 1$ ГэВ), что эквивалентно независимости энергии возбуждения ядра от энергии первичного адрона в указанном диапазоне энергии.

Энергия эмиссии испарительных и низкоэнергетических ($E < 20$ МэВ) каскадных заряженных частиц из возбужденного ядра, оставшегося после каскадной стадии, (E') описывается формулой

$$E' = N_b \bar{E}_b, \quad (26)$$

где N_b — среднее число b -частиц (всех тяжелых заряженных фрагментов и низкоэнергетических протонов); \bar{E}_b — средняя энергия спектра b -частиц.

Используя параметризацию зависимости N_b , справедливую для адронов с $E > 500$ МэВ: $N_b = 0.7A^{0.48}$ и $\bar{E}_b = (10 \pm 2)$ МэВ. В работе были рассчитаны значения коэффициентов конверсии для наиболее распространенных элементов ($H, C, N, O, Ca, Al, Fe, Cu, Ag, W, Pb$) и сложных веществ (детекторов частиц и мягкой биологической ткани) для области энергий 20 МэВ – 1 ТэВ. Рассчитанные коэффициенты конверсии для нейтронов и протонов представлены на рис. 17–18.

Для определения степени достоверности полученных выше коэффициентов конверсии были проведены многочисленные сравнения рассчитанных с их помощью поглощенных доз в тканеэквивалентных фантомах с экспериментальными данными, показавшие их хорошее (на уровне $\sim 15\%$) согласие.

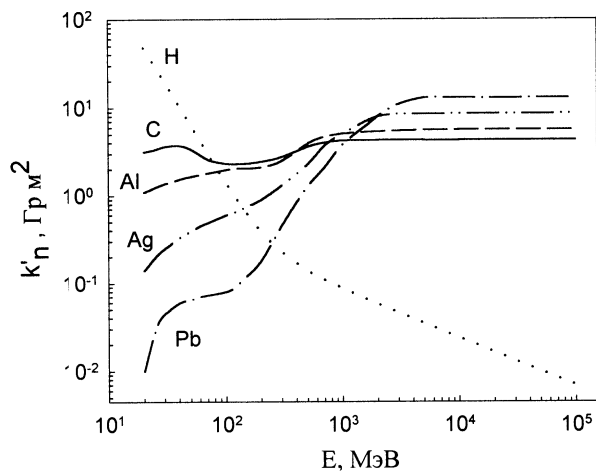


Рис. 17. Коэффициент конверсии “поток нейтронов – поглощенная доза” для изотопов H, C, Al, Ag, Pb.

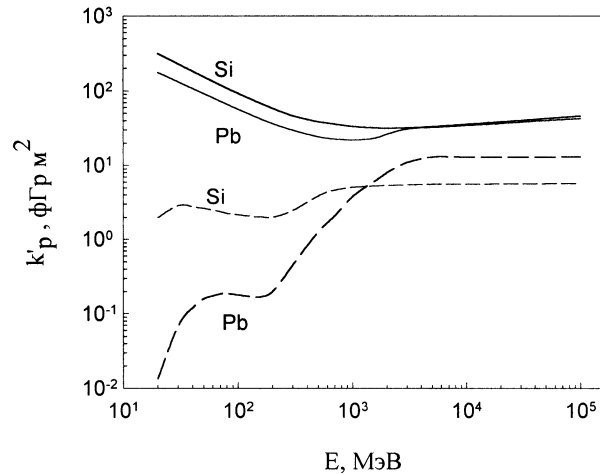


Рис. 18. Коэффициент конверсии “поток протонов – поглощенная доза” для изотопов Si, Pb. Пунктирные кривые — ядерная составляющая; сплошные — электромагнитная+ядерная.

Одной из важнейших задач радиационной физики и дозиметрии, связанной с переходом на концепцию эффективной дозы, является получение информации по дозовым характеристикам излучений в тканеэквивалентных фантомах с точностью $\sim 15-20\%$.

Разработанный алгоритм и программа расчета переноса излучений, а также появившиеся за последние годы уточненные константы и дозовые коэффициенты, как литературные, так и полученные в диссертации, позволили решить указанную задачу.

Расчеты проводились для фантома четырех стандартных геометрий: бесконечная пластина и нормальное облучение; бесконечная пластина и изотропное облучение; бесконечный цилиндр; сфера. Для нейтронов с $E < 20$ МэВ рассчитаны поглощенная и эквивалентная дозы, для высокоэнергетических адронов — поглощенная доза. Приведены расчетные распределения указанных величин по глубине тканеэквивалентных фантомов разной геометрии в зависимости от энергии адронов источника. Представленные подробные данные предназначены для использования в качестве справочного материала.

В седьмой главе исследуются функции отклика нейтронных детекторов и дозиметров.

Для целей спектрометрии и дозиметрии нейтронного излучения в мире широко используется детектор тепловых нейтронов в замедлителе (например, многосферный спектрометр Боннера). Основными недостатками такого детектора являются: значительная неопределенность в энергетической зависимости функции чувствительности; неудовлетворительное энергетическое разрешение, низкая чувствительность к

высокоэнергетическим адронам. Поэтому проведенные в диссертации исследования и представленные результаты посвящены в основном:

- 1) уточнению расчетным путем функции чувствительности традиционных шаровых детекторов;
- 2) анализу адекватности показаний нейтронных дозиметров данного типа, используемых в мире;
- 3) разработке модифицированных шаровых детекторов, имеющих в совокупности лучшее энергетическое разрешение и предназначенных для спектрометрии нейтронов с энергией до 400 МэВ.

Изложен метод расчета функций чувствительности (ФЧ) шаровых детекторов, основанный на расчете методом дискретных ординат переноса нейтрального и заряженного компонентов излучений в композиции замедлителя детектора. Изложены особенности подготовки констант с учетом термализации нейтронов для решения данной задачи.

Расчет ФЧ (ϵ)-шарового детектора нейтронов сводится к задаче расчета переноса нейтронов в шаровом замедлителе и последующему интегрированию по энергии и объему детектора:

$$\epsilon_i = \int dE \int dV F_i(r, E) \Sigma_d(E), \quad (27)$$

где $F_i(r, E)$ — спектр нейтронов в области детектора; $\Sigma_d(E)$ — макроскопическое сечение регистрации нейтронов детектором; V_d — объем детектора. В расчетах ФЧ шаровых детекторов принимались граничные условия, описывающие изотропный моноэнергетический источник на поверхности замедлителя.

Проанализирован вклад различных каналов реакции в сечение регистрации нейтронов детектором. Проведенные расчеты показали необходимость учета в показаниях детекторов в полях высокоэнергетических частиц наряду с реакцией (n, α) на тепловых нейтронах и реакции расщепления на высокоэнергетических адронах.

Представлены результаты расчетов функции чувствительности традиционных однородных шаровых детекторов и проведены их сравнения с литературными данными. Проведен анализ имеющихся расхождений. Показано, что данные настоящей работы согласуются с экспериментальными результатами по совокупности показаний шаровых детекторов разного диаметра в полях нейтронов с разными типами спектров лучше, чем данные других авторов.

Приведены расчетные значения функций чувствительности шаровых детекторов разных диаметров с кристаллом LiJ(Eu) в центре.

Изучены ФЧ гетерогенных шаровых детекторов с внутренним кадмиевым экраном, обладающих значительно лучшим разрешением по сравнению с однородными. (Ранее эта идея обсуждалась в публикациях Крамер-Агеева Е.А. с соавторами (МИФИ)).

Проведены оптимизационные расчеты размеров гетерогенных замедлителей детекторов. Впервые предложен спектрометр с оптимальным набором гетерогенных шаровых детекторов, имеющих лучшее энергетическое разрешение. Представлены

для практического использования рассчитанные значения ФЧ модифицированного спектрометра.

При всех достоинствах исследованных выше гомогенных и гетерогенных детекторов общим недостатком, затрудняющим их использование на ускорителях, является низкая чувствительность к высокоэнергетическим адронам. Предложенный новый шаровой детектор для регистрации высокоэнергетических адронов представляет собой $1/v$ -детектор нейтронов в центре шарового гетерогенного замедлителя, и самого замедлителя, состоящего из двух слоев: наружный — конвертер низкоэнергетических нейтронов (экран из тяжелого вещества, $A > 50$) толщиной $\sim 0,3 - 0,5 \lambda_{in}$ и внутренний — шаровой полиэтиленовый замедлитель диаметром ~ 25 см. (Схема предложенного детектора показана на рис. 19). Проведенные расчеты ФЧ предложенного детектора показали, что его чувствительность к нейтронам с энергией 20 – 300 МэВ в 20 раз выше, чем у широко используемого в практике дозиметрических измерений “двенадцатидюймового” полиэтиленового шарового детектора, (рис. 20) что позволяет его использовать для спектрометрии высокоэнергетических адронов.

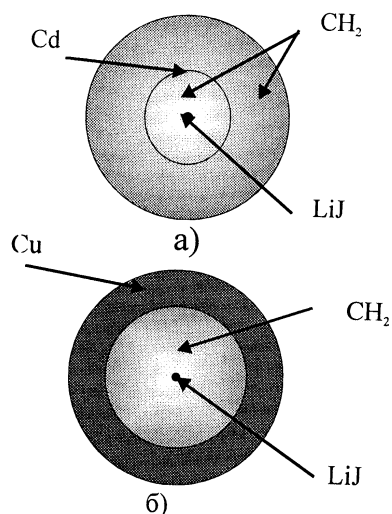


Рис. 19. Схема модифицированных шаровых детекторов нейтронов: а) детектор с улучшенным разрешением в области энергий $E < 10$ МэВ; б) детектор с увеличенной чувствительностью в области энергий $E > 10$ МэВ.

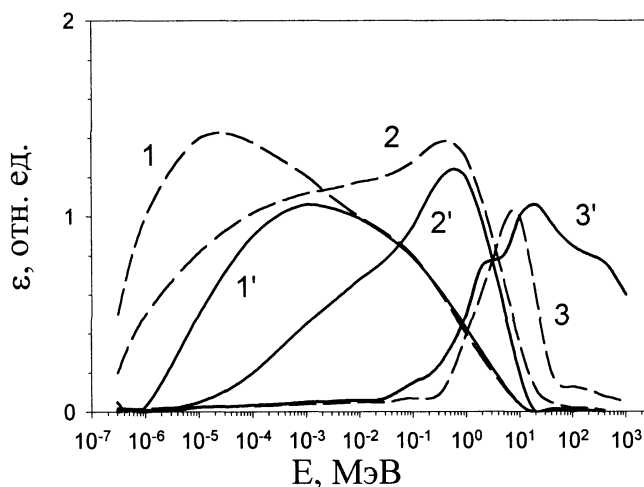


Рис. 20. Функции чувствительности нейтронных шаровых детекторов. 1, 2, 3 — гомогенным замедлителем. 1', 2', 3' — модифицированные: 1', 2' — с внутренним Cd-экраном, 3' — с внешним Cu-экраном.

Проведено расчетное исследование ФЧ и адекватности показаний четырех наиболее употребимых в практике дозиметрии радиометров (в том числе ДН-А-1 и счетчик Андерсена-Брауна), а также двух разработанных детекторов, в полях нейтронов со спектрами разной степени жесткости. В качестве критерия степени достоверности i -го радиометра в поле со спектром $f_j(E)$, откалиброванного в поле

нейтронов со спектром $f_s(E)$, принято отклонение ΔH_{ij} его показаний H_{ij} от истинного H_{hj} , рассчитываемого как:

$$\Delta H_{ij} = \frac{H_{ij} - H_{hj}}{H_{hj}} = \frac{\int_0^{E_{max}} f_s(E)h(E)dE \int_0^{E_{max}} f_j(E)\epsilon_i(E)dE}{\int_0^{E_{max}} f_s(E)\epsilon_i(E)dE \int_0^{E_{max}} f_j(E)h(E)dE}, \quad (28)$$

где $h(E)$ — регламентированная дозовая характеристика (например, максимальная эквивалентная доза).

Показано, что отклонения показаний максимальной эквивалентной дозы известных радиометров сильно зависят от формы калибровочного спектра и составляют в нейтронных полях с типичными спектрами величины порядка $\sim 25 - 50\%$, а в полях с жесткими спектрами, характерными для ускорителей, $\sim 120 - 360\%$. Отклонения показаний предложенного детектора с медным конвертером слабо зависят от спектра калибровочного источника, ни для одного спектра не превосходят 20% , а для жестких спектров составляют $\sim 5 - 10\%$. Таким образом, предлагаемый шаровой детектор может быть наиболее эффективно использован в качестве дозиметра эквивалентной дозы.

Восьмая глава посвящена решению практических радиационно-физических задач экспериментальной физики: проектированию радиационной защиты ускорительно-экспериментального комплекса У-70; определению параметров электроядерного реактора.

Обобщен многолетний опыт создания радиационной защиты каналов и экспериментальных установок на ускорительном комплексе У-70. Проектирование радиационной защиты каналов высокоэнергетических частиц представляет собой сложную и многоплановую научно-техническую задачу, включающую в себя и проблемы расчета потерь пучка, и задачи расчета распространения всех типов частиц в радиационной защите, (т.е. задачи, имеющей сложнейшие физические и математические аспекты), а также проблемы конструирования защиты.

В диссертации показаны физические и математические аспекты задачи проектирования радиационной защиты, связанной с расчетом пространственных распределений источников излучений и прохождения излучений в веществе. Основные принципы и последовательность проектирования радиационной защиты высокоэнергетических протонных ускорителей и каналов частиц, разработанные и используемые в ИФВЭ, состоят в: 1) анализе характеристик источников мгновенного адронного и мюонного излучения; 2) расчете размеров и конфигурации защиты от адронного и мюонного излучения от каждого источника; 3) нахождении общей (с учетом всех возможных источников адронов и мюонов) и оптимальной компоновки радиационной защиты.

Представлен краткий анализ источников адронного и мюонного излучений на спроектированных и успешно эксплуатируемых в настоящее время на синхротроне ИФВЭ высокоинтенсивных каналах частиц. Указанные источники обусловлены:

- потерями пучка на элементах системы вывода;
- взаимодействием протонов пучка с остаточным газом;
- потерями протонов гало пучка на вакуумной камере и магнитооптических элементах;
- взаимодействием протонов пучка с веществом мишени;
- высадкой частиц вторичного пучка на элементах систем импульсного анализа;
- гашением первичного и вторичного пучков в пробке–поглотителе.

Приведено описание источников излучения и рассчитанной и спроектированной радиационной защиты ускорительно-экспериментального комплекса У-70.

Дано изложение научных и технических решений, полученных в процессе проектирования радиационной защиты ускорительно-экспериментальной базы У-70 (экспериментального зала (рис. 21) с системой каналов частиц от внутренних мишеней и галереи (рис. 22) с системой высокоинтенсивных каналов выведенных пучков (нейтринного канала, канала меченых нейтрино, гиперонного канала, универсального канала с фокусирующим двухплечевым спектрометром).

Проведенный анализ данных радиационного контроля на экспериментальном комплексе ИФВЭ за несколько последних лет показывает:

- Накопленные за год дозы практически нигде не превышают величины 5 бэр/год — предела дозы (ПД), регламентированного НРБ-76.

- Средние значения интегральных доз в зале 1БВ на верхней защите ускорителя в 2-3 раза выше, чем средние по всем точкам ускорителя и вплотную приближаются (а в некоторых точках и превышают) значение ПД. Основной причиной сравнительно высоких уровней излучения в данном месте являются большие потери пучка при его “медленном” выводе. Поэтому уменьшение уровней доз на верхней защите, необходимое для повышения интенсивности пучка до проектной величины $5 \cdot 10^{13}$ п/ц, связано в первую очередь с увеличением эффективности “медленного” вывода.

- Высокие уровни излучения в районе XIII–XIV осей экспериментального зала целиком обусловлены сбросом пучка на мишени 24- и 27-го блоков. Это излучение является главным источником рассеянного излучения (эффект “sky-shine”), определяющего радиационную обстановку как в районе мишеней (в радиусе $R \sim 15–20$ метров), так и на больших расстояниях от ускорителя ($R \sim 100$ метров).

- Средние значения интегральных доз в районе экспериментальных установок каналов, работающих на внутренних мишенях, меняются очень слабо и практически не зависят от интегральной величины интенсивности в кольце. Это объясняется практически постоянной (не зависящей от полной интенсивности в кольце) величиной сброса интенсивности на внутренние мишени.

- Дозы в районе высокоинтенсивных каналов (8, 23, 22), являющихся основными потребителями пучка, значительно ниже как ПД, так и средних значений дозы по ускорителю, что свидетельствует о хорошем уровне проработок радиационно-физических и магнитооптических аспектов этих каналов, а также о наличии некоторого резерва, необходимого для повышения интенсивности и перехода к более жесткой величине ПД, регламентируемого НРБ-96, 2 бэр/год.

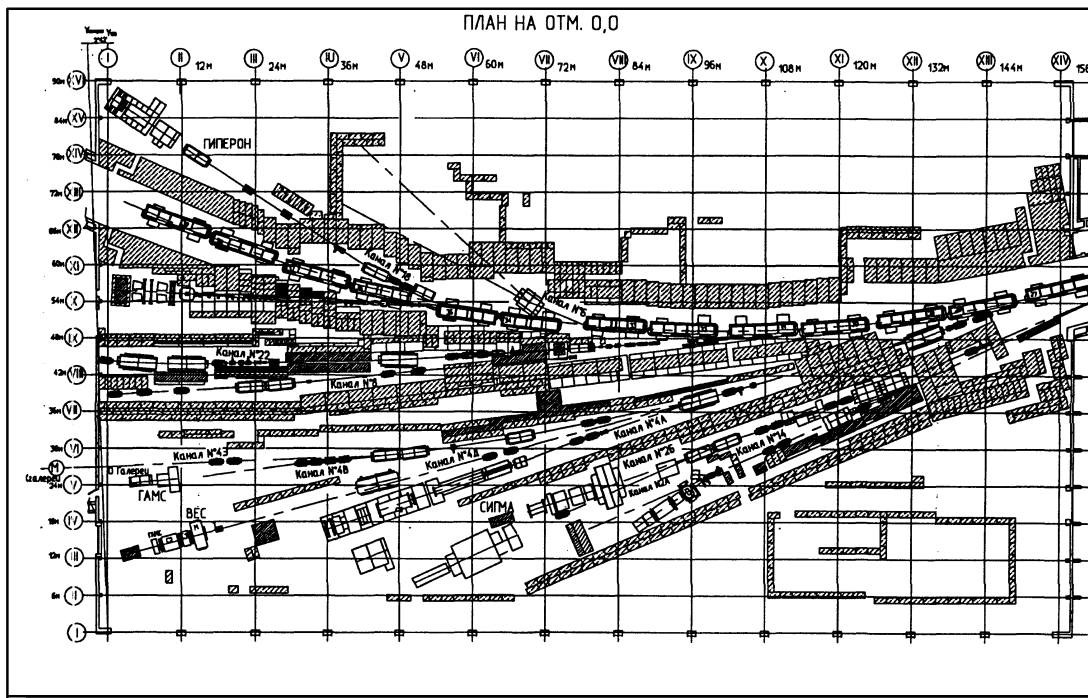


Рис. 21. Радиационная защита ускорителя и каналов частиц в экспериментальном зале ускорителя У-70.

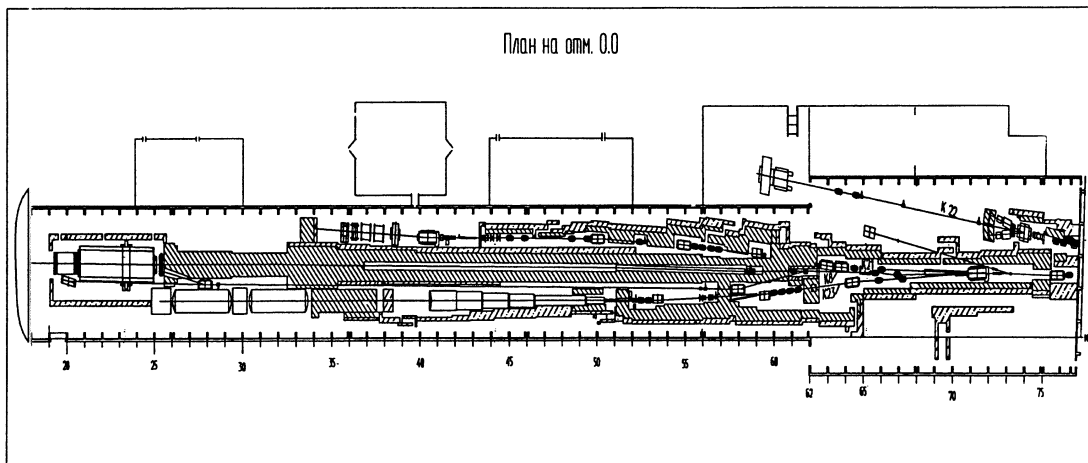


Рис. 22. Радиационная защита высокоинтенсивных каналов частиц галерейного комплекса ускорителя У-70.

Представленные данные свидетельствуют о надежности спроектированной в ИФВЭ радиационной защиты, а также подтверждают корректность разработанных в ИФВЭ методов решения задач радиационной физики. Созданные и много лет успешно эксплуатируемые каналы и экспериментальные установки подтвердили правильность общих принципов, положенных в основу проектирования радиационных защит.

Разработанный программный аппарат расчета переноса адронов в веществе (в том числе и в делящемся) оказался очень удобным для исследования физических аспектов электроядерного метода выработки энергии, суть которого состоит в иницировании цепной реакции в подкритическом реакторе нейтронами, генерируемыми в урановой или в свинцовой мишени протонным пучком, ускоренным до энергии несколько сотен МэВ. (Схема рассматриваемой электроядерной установки приведена на рис. 23). Электроядерный метод имеет ряд принципиальных преимуществ по сравнению с традиционными АЭС по безопасности, экономичности, экологической чистоте.

Одной из главных проблем в реализации идеи электроядерного реактора является выбор оптимальных параметров системы “ускоритель–реактор”: интенсивности и энергии пучка, типа реактора, значения его $k_{эф}$, вещества и размеров мишени. Поэтому в диссертации с целью выбора указанных параметров были проведены расчетные исследования. Оценка минимальных значений $k_{эф}$ сделана на основе баланса вырабатываемой и потребляемой системой “ускоритель–реактор” энергии:

$$k_{эф} = \frac{E_p \nu (1 + \alpha)}{n_o \omega K_1 K_2 + E_p \nu (1 + \alpha)}, \quad (29)$$

где E_p — энергия протонов; ν — среднее число нейтронов на акт деления; $\omega = 200$ МэВ — энергия, выделяемая в акте деления; K_1 — к.п.д. преобразования тепловой энергии в электрическую; K_2 — к.п.д. преобразования электрической энергии в энергию пучка протонов; α — параметр, учитывающий эффективность энергетической системы.

Безопасные максимальные значения $k_{эф}$ определяются диапазоном изменения реактивности реактора за счет температурных эффектов и эффекта отравления.

Выбор оптимального диапазона энергий пучка ускорителя был проведен на основании расчетных исследований выходов нейтронов из мишеней в зависимости от ее изотопного состава и размеров, энергии протонного пучка. Диапазон значений токов пучка протонов рассчитывался исходя из минимальной стоимости строительства и работы ускорителя, отнесенной к единице стоимости выработанной электроядерной системой энергии.

На основе проведенных расчетов показано, что наиболее эффективным типом реактора для электроядерной энергетике являются быстрый, а типом ускорителя — протонный линейный. Полученные значения оптимальных параметров:

$$k_{эф} = 0,97 - 0,98; \quad I = 10 - 20 \text{ мА}; \quad E = 500 - 800 \text{ МэВ}.$$

Необходимость использования сильноточных ускорителей (с токами пучка десятки и сотни миллиампер), обуславливает трудно разрешимые радиационно-физические проблемы электроядерных систем: высокие уровни мощности дозы излучения и высокие радиационные нагрузки на оборудование ускорителя, недопустимо большие локальные энерговыделения в мишени, расположенной в активной зоне реактора. (Расчитанные распределения энерговыделений по активной зоне электроядерного реактора представлены на рис. 24.)

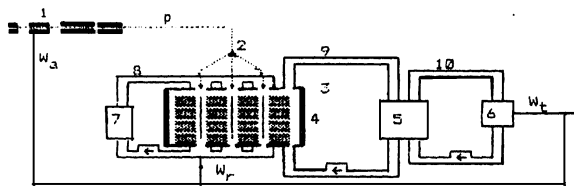


Рис. 23. Схема электроядерной установки.

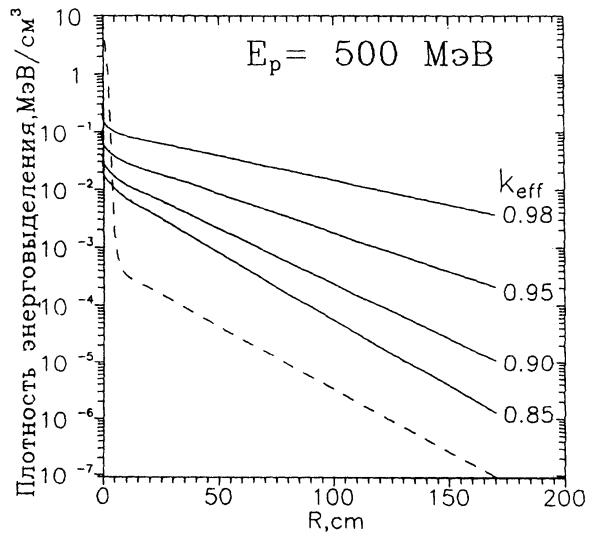


Рис. 24. Распределение энерговыделений в активной зоне электроядерного реактора.

Для решения проблемы больших локальных энерговыделений пучка в мишени, предложены технические решения: деление пучка перед его сбросом на мишени, его дефокусировка, разработка специальной тяжелой мишени с небольшой средней плотностью.

В научной литературе широко обсуждается возможность использования систем с вентильной нейтронной связью, которые предположительно позволят снизить необходимый ток электроядерных установок на порядок. Идея подобных систем заключается в умножении потока нейтронов в каскаде подкритических бланкетах, разделенных между собой перегородками с односторонней нейтронной связью. Основные вопросы при рассмотрении вентильных систем относятся к коэффициенту умножения энерговыделения в них и к сохранению внутренней безопасности при нарушении вентильной связи.

В диссертации проведено расчетное исследование эффективности, ядерной безопасности и пространственного распределения энерговыделения при сбросе пучка протонов с энергией 500 МэВ в таких системах с различными способами реализации вентильной связи (рис. 25): 1) первая зона — быстрый урановый бланкет, вентильная перегородка — слой кадмия, слой тяжелой воды; вторая зона — водоурановый бланкет; 2) первая зона — бланкет из Np^{237} , вентильная перегородка — слой тяжелой воды; вторая зона — водоурановый бланкет. Расчетные значения $k_{эф}$ как в первом, так и во втором бланкете в обеих системах составляло 0,95.

Показано (рис. 26), что использование вентильных систем действительно дает значительный выигрыш в выделяемой энергии: коэффициент умножения для первой системы составил 7,8, для второй — 5,2. В то же время расчеты показали наличие у них серьезных недостатков, к которым относятся:

1) отсутствие внутренней безопасности (в случае разрушения вентиляющей перегородки в первой системе значение $k_{эф}$ вырастает до 1,2, а во второй — до 1,02);

2) высокая энергонапряженность в первом бланкете (на три порядка превышающая среднюю по второму бланкету).

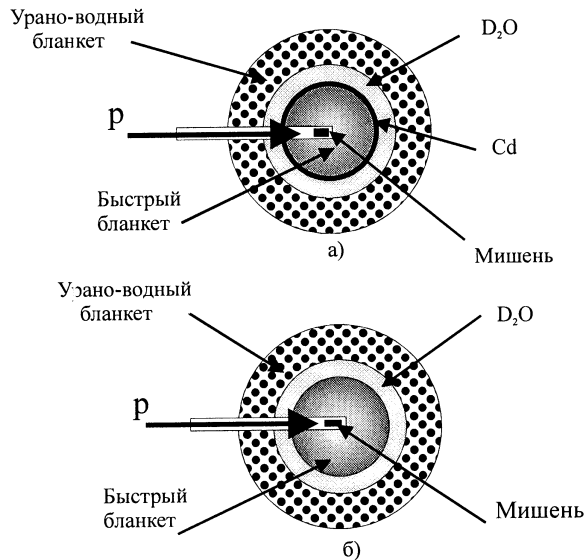


Рис. 25. Схема двухзонных подкритических реакторов с вентиляющей нейтронной связью для электроядерной установки.

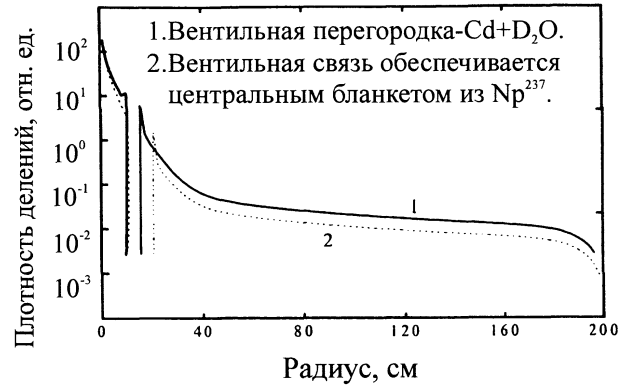


Рис. 26. Пространственное распределение энергосвечения в двухзонных реакторах с вентиляющей связью при сбросе пучка протонов энергией 500 МэВ.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- Разработана система константного обеспечения расчетов переноса частиц (n, p, π, γ с энергией в диапазоне: 10^{-2} эВ – 10 ТэВ для нейтронов, 10 МэВ – 10 ТэВ для заряженных частиц и 0,1 – 20 МэВ для фотонов) в веществе, включающая в себя параметризацию дваждыдифференциальных сечений неупругих адрон-ядерных взаимодействий и программный аппарат для расчета и формирования файла многогрупповых констант для указанных частиц и диапазонов энергий.
- Разработан программно-константный комплекс для численного решения задачи переноса нейтральных и заряженных частиц, генерируемых под действием высокоэнергетических адронов. Предложена аппроксимация энергетического оператора кинетического уравнения разностной схемой, а интеграла столкновений, включающего сильно анизотропную индикатрису неупругого ядерного hA -взаимодействия приближением Фокера-Планка. Получен явный вид коэффициентов Фокера-Планка. Разработана новая монте-карловская программа, реализующая сеточные методы для расчета характеристик частиц.

- Исследованы компонентный состав, пространственные и энергетические характеристики излучения в защите высокоэнергетических ускорителей. Показано установление равновесия между высокоэнергетическим, низкоэнергетическим и фотонным компонентами излучения в водородсодержащем веществе. Получены асимптотические соотношения между потоковыми и дозовыми компонентами излучения в бетоне. Одновременно показано отсутствие подобного равновесия в стальной защите.
Показано, что за “толстыми” гетерогенными “сталь+бетон” защитами сильноточных протонных ускорителей формируются поля излучения с доминирующим содержанием фотонов.
- Теоретически предсказан и исследован эффект образования полей нейтронного излучения в мюонных поглотителях высокоэнергетических адронных пучков в результате захвата отрицательных мюонов ядрами вещества.
- Исследованы закономерности формирования полей излучения за защитой высокоэнергетического протонного ускорителя. Получены параметризации, аппроксимирующие пространственные распределения потоковых и дозовых характеристик излучения в типичных геометриях ускорителей: 1) вокруг мишеней; 2) за защитой тракта транспортировки частиц; 3) рассеянного излучения.
- Проведено исследование дозовых характеристик излучений высокоэнергетических ускорителей. Рассчитаны керма-факторы для нейтронов с энергией 20 – 400 МэВ, коэффициенты конверсии “поток – поглощенная доза” для n, p, π с энергией в диапазоне 20 МэВ – 100 ГэВ, глубинные распределения поглощенной дозы в тканеэквивалентном фантоме.
- Расчетным путем исследованы характеристики нейтронных дозиметров и спектрометров, предложены и изучены модификации шаровых спектрометров нейтронов, имеющих лучшее разрешение и более высокую чувствительность к нейтронам с энергией $E > 20$ МэВ по отношению к общеизвестным. Разработан и запатентован как изобретение адронный дозиметр, имеющий функцию чувствительности адекватную регламентируемому соотношению “поток – эквивалентная доза”. Изучены характеристики фоновых загрузок мюонных калориметров.
- Представлены результаты разработки радиационной защиты синхротрона, высокоинтенсивных каналов и экспериментальных установок комплекса У-70, проведен анализ проблем проектирования радиационной защиты, изложены их научные и технические решения.
Надежная работа успешно эксплуатируемых каналов и экспериментальных установок, а также проведенный анализ данных радиационного контроля на экспериментальном комплексе ИФВЭ за несколько последних лет, подтверждают надежность спроектированной в ИФВЭ радиационной защиты, правильность общих принципов, положенных в основу проектирования радиационных защит и корректность разработанных в ИФВЭ методов решения задач радиационной физики.

- С помощью разработанного программного аппарата проведены расчетные исследования физических аспектов электроядерного метода производства энергии. Определены оптимальные параметры протонного ускорителя и подкритического реактора. Предложены решения для уменьшения неравномерности энерговыделения в активной зоне реактора. Путем математического моделирования изучены некоторые вопросы эффективности и внутренней безопасности систем с вентильной нейтронной связью. Показано, что выигрыш по энерговыделению в двухзонных бланкетах с вентильной связью составляет от 5 до 9 раз по сравнению с обычным подкритическим реактором.

Список литературы

- [1] Е.А. Белогорлов, Д.В. Горбатков, Г.И. Крупный, А.А. Кузнецов, В.П. Крючков, Я.Н. Расцветалов, Г.И. Семенова. Модификация мультисферного спектрометра для измерения высокоэнергетических спектров нейтронов. – В кн.: V Всесоюзная научная конференция по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Протвино, 1990.
- [2] В.П. Крючков, Г.И. Семенова. Разработка системы константного обеспечения расчета переноса нейтронов и протонов с энергией до 600 МэВ в веществе. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Выпуск 1, Москва, 1990.
- [3] А.М. Волощенко, Т.А. Гермогенова, Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Комплекс программ для расчета переноса высокоэнергетических адронов в веществе методом дискретных ординат. – В сб.: Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1990.
- [4] Voloschenko A.M., Gorbatkov D.V., Kryuchkov V.P., Yuldashev M.M. Numerical Solution of the Boltzmann-Fokker-Planck Equation for Charged Particle Transport. In: International Symposium “Numerical Transport Theory”. – Moscow, 1992, p.252.
- [5] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков, С.И. Стриганов. Дифференциальные сечения рождения адронов в неупругих hA -взаимодействиях для энергий первичных частиц 20 МэВ–10 ТэВ: Препринт ИФВЭ 92-172. Протвино, 1992;
Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Аппроксимация дваждыдифференциальных сечений неупругих адрон-ядерных взаимодействий в диапазоне энергий 20 МэВ – 10 ГэВ. – В сб.: Труды XIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1992.
- [6] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Особенности применения сеточных методов для расчета переноса высокоэнергетических адронов: Препринт ИФВЭ 92-171. Протвино, 1992.

- [7] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Поле фонового n - γ излучения за радиационными защитами радионуклидных источников нейтронов: Препринт ИФВЭ 93-51. Протвино, 1993.
- [8] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Характеристики фонового излучения за одномерными защитами пучков высокоэнергетических частиц: Препринт ИФВЭ 94-47. Протвино, 1994;
D.V. Gorbalkov, V.P. Kryuchkov. Space-energy characteristics of radiation component behind high-energy accelerator shielding. – In: Proceedings of the Fourth European Particle Accelerator Conference EPAC'94, v 2, p.2591, London, 1994.
- [9] В.П. Крючков, С.Л. Кучинин, В.Н. Лебедев, Н.В. Мохов, Я.Н. Расцветалов. Полуэмпирический метод расчета радиационной защиты ускорителей протонов. – В кн.: Труды третьей Всесоюзной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Тбилиси, 1985, Т.VI, с. 97
- [10] В.П. Крючков, А.М. Волощенко, Г.И. Семенова. Численное решение уравнений переноса адронов с энергией до 400 МэВ в одномерной защите: Препринт ИФВЭ 83-164. Серпухов, 1983.
- [11] В.П. Крючков, И.С. Байшев, В.Т. Головачик, В.Н. Кустарев, В.Н. Лебедев, Н.В. Мохов, М. Хеферт. Чувствительность борных детекторов в замедлителях к адронам высоких энергий: Препринт ИФВЭ 76-134. Серпухов, 1976.
- [12] В.П. Крючков, Г.И. Бритвич, Е.А. Белогорлов, Г.И. Крупный, В.Н. Лебедев, В.С. Луканин, Н.В. Мохов. Оптимизация толщины водородсодержащего поглотителя в гетерогенных боковых защитах ускорителей высокой энергии. – В кн.: Седьмое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1981, т.2, с. 180.
- [13] В.П. Крючков, В.Н. Лебедев, Я.Н. Расцветалов, М.Н. Чиманков. Поле излучения вокруг Серпуховского ускорителя протонов: Препринт ИФВЭ 83-21. Серпухов, 1983.
- [14] В.П. Крючков. Исследование закономерностей формирования полей излучения за защитой Серпуховского синхротрона на 76 ГэВ: Препринт ИФВЭ 83-166. Серпухов, 1983.
- [15] В.П. Крючков, Г.И. Семенова. Роль реакции μ^- -захвата ядрами железа в формировании полей нейтронов вокруг поглотителей мюонов высокоэнергетических адронных пучков. Атомная энергия. 1987, т.63, вып.3.
- [16] В.П. Крючков, Г.И. Семенова. Функции чувствительности многошарового спектрометра нейтронов: Препринт ИФВЭ 87-191. Серпухов, 1987.

- [17] В.П. Крючков, О.В. Суманев. Дозовые характеристики и компонентный состав поля излучения вокруг мишеней пучков высокоэнергетических частиц. – В кн.: XIV Совецание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т.4, с. 117.
- [18] D.V. Gorbatkov, V.P. Kryuchkov, O.V. Sumaneev. Program complex for high energy hadron transport calculations to solve radiation problems in accelerators. – In: Proceedings of the Fourth European Particle Accelerator Conference EPAC'94, v. 2, p. 2588. London, 1994;
- [19] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Компонентный состав эквивалентной дозы за радиационной защитой ускорителей протонов на высокие энергии. – В кн.: Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, Сборник докладов. Протвино, 1994, т.4, с.111.
- [20] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. САДКО–2 – система адронных констант для обеспечения расчетов переноса высокоэнергетического излучения групповыми методами: Препринт ИФВЭ 95-22. Протвино, 1995;
Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Система САДКО–2 для обеспечения расчета переноса высокоэнергетического излучения групповыми методами. Атомная энергия, 1995. Т.79, вып.4.
- [21] D.V. Gorbatkov, V.P. Kryuchkov. SADCO–2: a modular system for generating coupled nuclear data libraries to provide high-energy particle transport calculation by multigroup method. NIM. 1966, A 372, p.297.
- [22] D.V. Gorbatkov, V.P. Kryuchkov. A comparison of computational data, obtained with a variety of well-known radiation transport codes. NIM. 1966, A 374, p.95;
Д.В. Горбатков, В.П. Крючков. Сравнение результатов расчета переноса излучения различными программами. Атомная энергия, 1995. Т.79, вып.4.
- [23] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков, О.В. Суманев. Керма-факторы для расчета поглощенной дозы от нейтронов с энергией 15–150 МэВ в детекторах частиц и биологической ткани. Препринт ИФВЭ 95-148, 1995;
Д.В. Горбатков, В.П. Крючков, О.В. Суманев. Керма-факторы для расчета поглощенной дозы от нейтронов энергией 15-150 МэВ. Атомная энергия, 1966. Т.80, вып.4.
- [24] Yu.M. Ado, D.V. Gorbatkov, V.P. Kryuchkov, V.N. Lebedev. Some advantages and disadvantages of electronuclear power system based on a two-section blanket. – In: Proceedings of the Eighth International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems ICENES'96, Obninsk, 1996, v.1, p. 587.
- [25] Yu.M. Ado, V.P. Kryuchkov, V.N. Lebedev. Power production by Atomic Power-Accelerator station Based on Accelerator and Subcritical Nuclear Reactor. – In:

Proceedings of the Fourth European Particle Accelerator Conference EPAC'94, v.1, p.267, London, 1994;

Ю.М. Адо, В.П. Крючков, В.Н. Лебедев. Энергетический подкритический реактор с подсветкой пучком ускоренных протонов. Атомная энергия, 1994, т.77, вып.4.

- [26] В.П. Крючков, В.П. Лебедев. Предварительный анализ радиационных проблем электроядерного энергетического реактора. – В кн.: Труды XIV совещание по ускорителям заряженных частиц. Сборник докладов. Протвино, 1994, т.4, с. 138.
- [27] В.П. Крючков, О.В. Суманев. Подготовка групповых констант для расчетов переноса n, γ – излучения методом Монте-Карло: Препринт ИФВЭ 94-134, Протвино 1994;
- [28] В.П. Крючков, О.В. Суманев. Ослабление эквивалентной дозы нейтронов в геометрии вентиляционной шахты УНК. – В кн.: XIII совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1992.
- [29] В.П. Крючков, О.В. Суманев. Программа расчета переноса частиц (n, p, π, γ) в веществе методом Монте-Карло (MOSKIT). – В кн.: XIII Совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1992;
В.П. Крючков, О.В. Суманев. MOSKIT1-программа для решения задачи переноса частиц (n, p, π, γ) в веществе методом Монте-Карло. (Алгоритм, инструкция). Препринт ИФВЭ 92-132. Протвино, 1992.
- [30] В.П. Крючков, О.В. Суманев. Расчетное исследование формирования дозы нейтронов в защитных лабиринтах: Препринт ИФВЭ 92-173. Протвино, 1992.
- [31] В.П. Крючков, В.Н. Лебедев, Г.И. Семенова. Оптимизация конструкции шаровых детекторов для интерпретации показаний нейтронных радиометров: Препринт ИФВЭ 89-230. Протвино, 1989.
- [32] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков, О.В. Суманев. Дозовые характеристики нейтронов с энергией от тепловых до 20 МэВ в тканеэквивалентных фантомах. Препринт ИФВЭ 96-78, Протвино, 1996.
- [33] Д.В. Горбатков, В.П. Крючков, О.В. Суманев. Коэффициенты конверсии поток-доза для расчета поглощенной дозы высокоэнергетических адронов: Препринт ИФВЭ 99-20. Протвино, 1999.
- [34] В.Е. Бородин, В.Н. Запольский, В.П. Крючков, С.Л. Кучинин, В.Н. Лебедев, Б.А. Серебряков. Радиационная защита ускорительно-экспериментального комплекса У-70: Препринт ИФВЭ 98-42. Протвино, 1998.

- [35] В.Е. Бородин, Г.И. Крупный, В.П. Крючков, С.Л. Кучинин, В.Н. Лебедев, В.С. Луканин, Я.Н. Расцветалов, Е.Ф. Соколов, М.Н. Чиманков. Нейтринный канал ИФВЭ. Журнал технической физики. 1977, т.48, в.1, с. 109;
В.Е. Бородин, Г.И. Крупный, В.П. Крючков и др. Препринт ИФВЭ 76-90. Серпухов, 1976.
- [36] В.П. Крючков. Адронный дозиметр. Патент изобретения № 1521075, Госкомизобретений. Москва, 1989.
- [37] В.П.Крючков, О.В.Суманеев. Расчетное исследование формирования дозы нейтронов в защитных лабиринтах. Препринт ИФВЭ 92-173, Протвино, 1992
- [38] В.П. Крючков, В.Н. Лебедев, Г.И. Семенова. Оптимизация конструкции шаровых детекторов для интерпретации показаний нейтронных радиометров: Препринт ИФВЭ 89-230. Протвино, 1989.
- [39] A. Alexeev, D. Gorbatkov, T. Kosako, V. Kryuchkov, K. Mio, E. Savitskaya, O. Sumaneev. Shielding Calculation for Design of Target Station for High Power Spallation Neutron Source: Preprint IHEP 98-43. Protvino, 1998.
- [40] В.П. Крючков. Константное обеспечение расчетов переноса нейтронов в области энергий 0,02 эВ – 400 МэВ. (Библиотека БНД -400). Препринт 80-35. Серпухов, 1980.

Рукопись поступила 12 мая 1999 г.

В.П. Крючков.

Исследование образования и распространения излучений на высокоэнергетических ускорителях протонов путем математического моделирования адронных каскадов в веществе.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 13.05.99. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 5. Уч.-изд.л. 3,84. Тираж 100. Заказ 97. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

