

C - 329

16-82-678

СЕРОВ

Александр Яковлевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ,  
ГЕНЕРИРУЕМЫХ В МИШЕНЯХ  
И ПОГЛОТИТЕЛЯХ ПРОТОНАМИ  
С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 0,1 ДО 3 ГэВ

Специальность: 01.04.01 – экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В. С. Сычев

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук  
кандидат физико-математических наук

Р. И. Зулькарнеев  
В. Е. Дудкин

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт.

Защита диссертации состоится "28" декабрь 1982г. в  
14 часов на заседании Специализированного совета  
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного инсти-  
тута ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "10" октябрь 1982 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
доктор физико-математических наук

Ю. А. Батусов

## Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Прогнозирование полей излучений приобретает все большее значение в связи с созданием сильноточных ускорителей и реконструкцией действующих с целью повышения интенсивности пучка. Использование ускоренных протонов для решения таких прикладных задач, как лучевая терапия и получение интенсивных потоков нейтронов диктует необходимость всестороннего изучения ядерно-каскадных процессов в конденсированных средах при энергии частиц в десятки и сотни мегаэлектронвольт. Для решения практических проблем, возникающих как при эксплуатации ускорителей, так и при проектировании новых установок, требуется информация о компонентном составе полей излучения, об энергетических, а зачастую и о спектрально-угловых распределениях не только нейтронного, но и заряженного компонента полей излучения.

Основная цель работы состояла в исследовании дифференциальных характеристик полей заряженных частиц, генерируемых в мишенях и поглотителях ускоренными протонами с энергией до нескольких ГэВ. Для решения поставленной задачи необходимо как использование расчетно-теоретических методов исследования переноса излучений, так и проведение экспериментальных исследований на пучках частиц высокой энергии.

Решение поставленной задачи заключалось:

- в разработке методики расчета характеристик поля излучения, образующегося под действием узких пучков протонов с энергией до нескольких ГэВ;
- в создании спектрометра, позволяющего измерять энергетические распределения заряженных частиц;
- в экспериментальном исследовании дифференциальных характеристик поля заряженных частиц;
- в экспериментальной проверке расчетной методики;
- в применении результатов исследования для решения задач радиационной физики.

Научная новизна и практическая значимость. Впервые получены в абсолютных единицах экспериментальные данные о спектрально-угловых распределениях вторичных протонов, образующихся в мишенях и поглотителях под действием первичных протонов с энергией 640 МэВ; эти данные дополняют фактический материал, который может использоваться для апробации расчетных методик. Впервые для расчета межъядерного каскада в двумерной геометрии применен метод последовательных столкновений; на основании этого метода создан комплекс вычислительных программ, предназначенных для определения характеристик полей вто-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

ричных излучений в двумерной геометрии; эффективность расчетной методики подтверждается удовлетворительным согласием результатов расчета и экспериментальных данных в диапазоне энергий первичных протонов от 0,1 до 3 ГэВ. С помощью разработанной методики расчета были исследованы характеристики интенсивного пучка нейтронов высокой энергии для терапевтического комплекса Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 182 страницы, включая 67 рисунков и 11 таблиц. Библиографический список состоит из 115 наименований.

Апробация работы. Основные результаты диссертации систематически докладывались на семинарах комиссии "Радиационная защита и работа в условиях высоких уровней ионизирующих излучений" Научного Совета АН СССР по проблемам ускорения заряженных частиц, на I (Москва, МИФИ, 1974г.) и II (Москва, МИФИ, 1978г.) Всесоюзных конференциях по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, на V Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1976г.).

Публикация. Основное содержание работы опубликовано в 8 статьях.

#### Содержание диссертации

Во введении отмечается актуальность проблемы исследования и формулируется основная цель работы. Дано краткое содержание диссертации по главам и приводится краткая аннотация основных положений, которые выносятся на защиту.

В первой главе проводится анализ литературных данных по проблеме прогнозирования полей заряженных частиц на ускорителях протонов с энергией до 1 ГэВ.

Для установления закономерностей формирования полей заряженных частиц и для получения детальной информации о дифференциальных характеристиках этих полей необходимо проведение расчетно-теоретических исследований переноса излучения в веществе. Основным критерием достоверности результатов этих исследований является их сравнение с результатами соответствующих экспериментов.

Для исследования переноса адронов в веществе требуется систематизированная информация о полных и дифференциальных сечениях неупругого взаимодействия высокоэнергетических адронов с ядрами.

В работе приведен обзор и дан анализ экспериментальных результатов по дифференциальным сечениям образования заряженных частиц (протонов и  $\pi^{\pm}$  мезонов) при неупругих взаимодействиях с ядрами адронов с энергией от 100 МэВ до 1000 МэВ. Несмотря на то, что к настоящему времени выполнен ряд детальных и тщательных экспериментов, в которых исследовались спектры заряженных частиц в широком диапазоне энергий

и углов эмиссии для различных ядер-мишеней и накоплен обширный фактический материал, следует, однако, заметить:

1. Во многих случаях этот материал имеет отрывочный характер, экспериментальные данные относятся к различным ядрам и различным интервалам энергии.

2. Иногда встречаются значительные расхождения экспериментальных данных, полученных различными авторами.

3. Большинство экспериментальных данных относится к протон-ядерным взаимодействиям.

4. Изучению нейтрон-ядерных и пион-ядерных взаимодействий посвящено всего лишь несколько работ.

Наряду с экспериментальным изучением, проводится также и расчетно-теоретическое исследование характеристик неупругого взаимодействия частиц с ядрами с помощью каскадно-испарительной модели. Результаты этих расчетов позволяют восполнить пробелы в экспериментальной информации.

Для определения двойных дифференциальных распределений каскадных частиц используются также различного рода аналитические зависимости, полученные путем аппроксимации как результатов экспериментов, так и результатов расчета по каскадно-испарительной модели.

При прогнозировании полей вторичных излучений на ускорителях протонов требуется подробная информация о развитии межядерного каскада в веществе в реальной геометрии экспериментальных установок, защит и т.п.

Практически единственным методом решения этих задач до настоящего времени являлся метод Монте-Карло. Программы, основанные на методе Монте-Карло, позволяют удовлетворительно воспроизводить ряд важных характеристик межядерного каскада. Вместе с этим, моделирование каскада методом Монте-Карло имеет некоторые ограничения. В частности, как следует из литературных данных, эти программы не позволяют эффективно получать информацию о дифференциальных характеристиках заряженных частиц даже за относительно тонкими мишенями (толщина порядка одной длины пробега до неупругого взаимодействия).

Экспериментальная информация, которую можно использовать для апробации методов расчета характеристик полей заряженных частиц, весьма ограничена. В особенности это относится к данным о заряженных частицах за поглотителями толщиной, превышающей ионизационный пробег первичных протонов.

На основании литературного обзора сформулированы основные задачи исследования:

- разработать методику расчета межядерного каскада в двумерной геометрии, позволяющую рассчитывать характеристики нейтронного

и заряженного компонента поля излучения, которое образуется в блоках вещества под действием протонов с энергией до нескольких ГэВ;

- создать спектрометр заряженных частиц, позволяющий проводить измерения в различных радиационно-значимых ситуациях;
- провести экспериментальное исследование дифференциальных характеристик полей заряженных частиц;
- выполнить экспериментальную проверку созданной расчетной методики;
- использовать разработанную расчетную методику для решения задач радиационной физики.

Во второй главе приводится описание методики расчета межъядерного каскада в двумерной геометрии, основанной на методе последовательных столкновений.

Поле вторичных излучений, возникающих в блоке вещества при его облучении узким пучком адронов, характеризуется функцией распределения  $\Phi_i(r, z, \theta, \psi, E)$  плотности потока частиц типа  $i$ , которая описывается следующей системой уравнений переноса (цилиндрическая система координат, направление пучка совпадает с осью  $z$ ):

$$\Phi_i(r, z, \theta, \psi, E) = \Phi_i^{(0)}(r, z, \theta, \psi, E) + \sum_{j=1}^N \int_{z_{\min}^j}^{z_{\max}^j} \frac{dz'}{\cos \theta} \exp(-P_i(z, z', \theta, E)) \cdot \eta_i(E, E') \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^\pi \sin \theta' d\theta' \int_{E_0}^{E'} \sum_j(E') \Phi_j(r', z', \theta', \psi', E') K_{ji}(E', E', \alpha) dE', \quad (1)$$

где  $\Phi_i^{(0)}(r, z, \theta, \psi, E)$  - функция распределения плотности потока непрореагировавших частиц источника; для нейтронов ( $i=n$ ):

$$E^x = E; \eta_i(E, E') = 1; P_i(z, z', \theta, E) = [\Sigma_i(E) + \Sigma_i^{(dec)}(E)](z - z') / \cos \theta;$$

для заряженных частиц ( $i=p, \pi^\pm$ ):  $E^x$  определяется из соотношения:

$$R_i(E^x) = R_i(E) + (z - z') / \cos \theta, \text{ где } R_i(E) - \text{средний ионизационный пробег частицы типа } i, \text{ имеющей энергию } E;$$

$$\eta_i(E, E') = \beta_i(E^x) / \beta_i(E), \text{ где } \beta_i(E) - \text{средние ионизационные потери энергии частицей типа } i \text{ на единице пути в веществе;}$$

$$P_i(z, z', \theta, E) = \int_{E_0}^{E'} [\Sigma_i(E'') + \Sigma_i^{(dec)}(E'')] dE'' / \beta_i(E'');$$

$\Sigma_i(E)$  - макроскопическое сечение ядерного взаимодействия частицы типа  $i$  с ядрами среды;  $\Sigma_i^{(dec)}(E)$  - вероятность распада нестабильных частиц сорта  $i$  на единице длины;  $K_{ji}(E', E', \alpha)$  - двойное дифференциальное распределение частиц типа  $i$  с энергией  $E^x$ , образующихся при взаимодействии частицы типа  $j$  с ядром;  $\alpha$  - угол между направлениями движения первичной ( $j$ ) и вторичной ( $i$ ) частиц;

$N$  - число типов рассматриваемых сильновзаимодействующих частиц;  $E_0$  - максимальная энергия частиц источника.

Решение системы уравнений (1) методом последовательных столкновений состоит в последовательном определении функций распределения частиц, возникающих при взаимодействии частиц предыдущего поколения,

начиная с функции распределения первичных частиц. При этом решение системы уравнений (1) представляется в виде ряда:

$$\Phi_i(r, z, \theta, \psi, E) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_i^{(n)}(r, z, \theta, \psi, E), \quad (2)$$

где  $\Phi_i^{(n)}(r, z, \theta, \psi, E)$  - функция распределения частиц ( $n$ )-го поколения, образовавшихся в результате взаимодействия частиц ( $n-1$ )-го поколения. Вычисление членов ряда (2) осуществляется с помощью рекуррентных соотношений, которые получаются при подстановке выражения (2) в систему уравнений (1):

$$\Phi_i^{(n)}(r, z, \theta, \psi, E) = \sum_{j=1}^N \int_{z_{\min}^j}^{z_{\max}^j} \frac{dz'}{\cos \theta} \exp(-P_i(z, z', \theta, E)) \eta_i(E, E') \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^\pi \sin \theta' d\theta' \int_{E_0}^{E'} \sum_j(E') \Phi_j^{(n-1)}(r', z', \theta', \psi', E') K_{ji}(E', E', \alpha) dE'. \quad (3)$$

Это соотношение связывает функцию распределения частиц каждого сорта ( $n$ )-го поколения с функциями распределения частиц всех сортов предыдущего поколения.

Процедура вычислений состоит в следующем. Путем подстановки в соотношение (3) выражения для функции распределения частиц нулевого поколения, т.е. частиц источника излучения, определяется функция распределения частиц первого поколения в узловых точках. Результаты расчетов в виде числовых массивов подставляются в соотношение (3), причем значения функции распределения в промежуточных точках находятся с помощью процедуры интерполяции. В результате численного интегрирования определяется функция распределения частиц второго поколения. И так далее, до тех пор, пока очередной член разложения (2) не станет пренебрежимо мал по сравнению с суммой предыдущих членов. Такая процедура дает возможность не увеличивать кратность интегрирования при расчете функций распределения частиц второго и последующих поколений. В такой формулировке метод последовательных столкновений представляет собой моделирование переноса адронов высокой энергии в двумерной геометрии.

В работе приведено описание используемой сетки узловых точек по всем переменным функции распределения, а также процедуры определения области интегрирования, значимой для расчета функций распределения следующего поколения.

Составление алгоритма вычислительной программы для расчета межъядерного каскада согласно изложенному формализму метода последовательных столкновений является вполне выполнимой задачей. Однако реализация вычислений по этой программе была бы невозможна, если принять во внимание быстродействие и объем оперативной памяти современных ЭВМ, таких, как БЭСМ-6. Исходя из этого алгоритмы вычислительных программ были составлены с введением упрощений и допущений. Основная цель введения приближений состояла в том, чтобы сократить

время расчета. Для этого требовалось, в первую очередь, уменьшить кратность интегрирования в рекуррентном соотношении (3). В результате были разработаны алгоритмы и создан комплекс вычислительных программ "CASC-2". В таблице I приведены краткие характеристики программ, входящих в этот комплекс.

Таблица I.

Характеристика комплекса программ "CASC-2".

---

Программа "DIKT". Рассчитываются спектрально-угловые распределения вторичных нуклонов. Учитывается вклад трех поколений частиц. Рассматривается двухкомпонентный каскад ( $n, p$ ). Приблизительно учтено угловое распределение частиц первого поколения. Область применения: толщина мишеней  $Z_0 \leq \lambda$  ( $\lambda$  - длина пробега нуклонов до неупругого взаимодействия); радиус  $r_0 \leq \lambda$ ; энергия первичных частиц  $E_0 < 1$  ГэВ. Среднее время расчета одного варианта  $\sim 30$  минут.

---

Программа "SONIC". Предназначена для оценки вклада частиц третьего и следующих поколений в решение, получаемое по программе "DIKT". Приближения: источник излучения при расчете каждого столкновения - линейный на оси мишени; направление движения частиц перед взаимодействием совпадает с направлением первичного пучка. Область применимости:  $r_0 \ll Z_0$ ;  $E_0 > 400$  МэВ. Время расчета 10 столкновений с получением требуемых характеристик  $\sim 30$  минут.

---

Программа "LOTYQ". Рассчитывается суммарная по типу каскадных частиц функция распределения. Основные приближения: рассматривается однокомпонентный каскад; приближенно учитывается угловое распределение частиц каждого поколения. Область применимости:  $Z_0 \leq 5\lambda$ ;  $r_0 \leq 3\lambda$ ;  $E_0 \leq 3$  ГэВ. Среднее время расчета - 4 часа.

---

Программа "SPEPAT". Предназначена для расчета спектрально-угловых и пространственно-энергетических распределений каждого типа вторичных излучений. В качестве входной информации используются результаты расчета функции распределения каскадных частиц по программе "LOTYQ". Среднее время расчета одного варианта  $\sim 15$  минут.

---

Программа "EMCADO". Рассчитываются характеристики поля вторичного излучения, которые соответствуют величинам, измеряемым активационными детекторами, ядерными эмульсиями, рентгеновскими пленками и т.п. Исходная информация - результаты расчета по программе "LOTYQ". В зависимости от типа функционала расчет занимает время от 10 мин. до 3 час.

Времена реализации вычислений, которые приведены в таблице, относятся к ЭВМ класса БЭСМ-6.

В третьей главе обосновывается выбор время-пролетной методики для измерений энергетических спектров заряженных частиц, приведено описание спектрометра по времени пролета и его основных характеристик.

Рассмотрение основных методов измерения энергетических спектров показало, что для решения поставленных задач вполне приемлемым является метод по времени пролета. Показано, что использование спектрометра по времени пролета с временным разрешением  $2\tau \sim 1-2$  нс обеспечивает адекватное преобразование временных спектров в энергетические распределения в случае измерения типичных спектров за защитой ускорителей.

Созданный спектрометр по времени пролета представляет собой телескоп из четырех сцинтилляционных счетчиков, в которых использованы фотоумножители (ФЭУ-30), отобранные по максимальной чувствительности фотокатода. Временной анализ осуществлялся с помощью блоков наносекундной электроники, разработанных в ЛЯП ОИЯИ. Для настройки и калибровки спектрометрического тракта, а также для контроля стабильности работы спектрометра во время измерений использовались импульсные источники света из фосфида галлия. Экспериментально определено временное разрешение спектрометра:  $2\tau = 1$  нс.

Для преобразования измеренных временных спектров в энергетические распределения была создана расчетная программа "TIMEN". В качестве исходной информации использовались данные о временных спектрах, о калибровке спектрометрического тракта, о временном разрешении, показания монитора и результаты его калибровки, а также результаты расчетов по вспомогательным программам "USE" и "SCAT". В программе "USE" реализован алгоритм, моделирующий процесс пролета заряженных частиц от мишени до последнего счетчика телескопа. Результатом расчета является зависимость времени пролета заряженными частицами базового расстояния от их энергии с учетом ионизационных потерь энергии, а также значение эффективного нижнего энергетического порога регистрации спектрометра. С помощью программы "SCAT" рассчитываются поправочные коэффициенты, предназначенные для коррекции спектров заряженных частиц на потери из-за многократного кулоновского рассеяния в регистрирующей аппаратуре.

До проведения экспериментов была выполнена настройка и проверка работоспособности спектрометра на выведенном пучке протонов синхротрона ЛЯП ОИЯИ. Выполнен эксперимент по измерению энер-

гетических спектров протонов, образующихся в тонких медной и свинцовой мишенях под действием пучка протонов. Результаты эксперимента сравнивались с имеющимися экспериментальными данными, полученными в подобных условиях. Сравнение показало удовлетворительное согласие по абсолютным величинам дифференциальных сечений.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований дифференциальных и интегральных характеристик вторичных излучений, генерируемых в мишенях и поглотителях.

Эксперименты проводились на выведенном пучке протонов синхротрона ЛЯП ОИЯИ. Энергия протонов в выведенном пучке - 640 МэВ. Мониторинг интенсивности пучка протонов осуществлялся с помощью ионизационной камеры. Для абсолютной калибровки камеры проводилось облучение алюминиевых фольг и измерение абсолютного выхода изотопов  $^{24}\text{Na}$  и  $^{18}\text{F}$ . Оцениваемая погрешность калибровки ионизационной камеры и соответственно определения интенсивности пучка - (10÷12)%.

Измерены дифференциальные сечения образования вторичных протонов под углом  $80^\circ$  при неупругом взаимодействии протонов с ядрами  $\text{C}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Pb}$ . В качестве мишеней использовались пластины толщиной 3, 14, 4,76 и 7,88 г/см<sup>2</sup> из углерода, меди и свинца соответственно.

Проведено исследование спектрального выхода заряженных частиц с боковой поверхности толстых мишеней. Мишень представляла собой цилиндр из стали, длиной по пучку 16 см и переменным радиусом от 3 до 7,5 см. Согласно условиям этого эксперимента, был выполнен расчет с помощью программы "DIAT". Показано, что даже в том случае, когда радиус мишени максимален (7,5 см), формирование спектра заряженных частиц происходит, в основном, за счет частиц первого поколения. Вклад частиц второго поколения составляет несколько процентов в области энергий ниже 150 МэВ.

В диссертационной работе было выполнено исследование поля вторичных излучений за свинцовым поглотителем (толщина  $\sim 3,5\lambda$ ) при гашении в нем протонного пучка. Энергетический спектр протонов ( $E_p = 60 \div 360$  МэВ), испускаемых с торца поглотителя, был измерен под углом  $16^\circ$  относительно направления движения пучка. Для более детального исследования поля излучения были выполнены измерения пространственно-энергетического распределения протонов и радиальных распределений вторичного излучения, выходящего из свинцового поглотителя (толщина по пучку - 680 г/см<sup>2</sup>). Определены энергетические спектры протонов, испущенных с поверхности торца поглотителя под углом  $0^\circ$  относительно оси пучка при трех значениях радиуса  $r = 0,15$  и 25 см.  $r$  - есть расстояние от точки пересечения оси спектрометра до точки пересечения оси пучка с поверхностью торца поглотителя.

Систематическая погрешность измерений энергетических спектров протонов составила  $\sim 14\%$ . При ее определении учитывалась погрешность мониторинга пучка ( $\sim 12\%$ ), неточность калибровки спектрометра ( $\sim 6\%$ ), а также вклад во временные спектры протонов, возникающих при взаимодействии нейтронов с веществом сцинтиллятора первого счетчика ( $\sim 3\%$ ). Вклад  $\pi^\pm$  - мезонов в энергетические спектры протонов составляет, согласно оценкам,  $\sim 10\%$  при энергии протонов  $\sim 400$  МэВ, а затем быстро падает с уменьшением энергии протонов. Так, для протонов с энергией 200 МэВ, что соответствует по времени пролета  $\pi$  - мезонам с энергией  $\sim 30$  МэВ (нижний порог регистрации спектрометра по энергии), этот вклад менее 1%.

Измерения радиальных распределений флюенса вторичных частиц на поверхности торца поглотителя проводились с использованием углеродных детекторов и ядерных эмульсий типа "K" (эффективная верхняя граница регистрации протонов  $\sim 150$  МэВ).

В работе проведено сравнение полученных экспериментальных данных по характеристикам поля излучений за свинцовым поглотителем с результатами расчетов по программам "LOTQA", "SPEPAT" и "EMCADO" согласно условиям экспериментов. Наблюдается удовлетворительное согласие сравниваемых спектров. Показано, что формирование протонного компонента за поглотителем происходит, в основном, в результате неупругого взаимодействия нейтронов первого и второго поколений с ядрами вещества.

В пятой главе проведено сравнение результатов расчета по программе "DIAT" с литературными экспериментальными данными и исследование условий формирования нейтронного пучка, предназначенного для терапевтического комплекса ЛЯП ОИЯИ.

Для апробации программы были использованы данные по спектрально-угловым распределениям вторичных протонов и нейтронов, испускаемых из мишеней под действием узкого пучка протонов с энергией 160 и 450 МэВ. Диапазон углов эмиссии - от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ . Мишени имели толщину как большую, так и меньшую, чем ионизационный пробег первичных протонов. Результаты расчетов по программе "DIAT" сопоставляются также с результатами расчета методом Монте-Карло (программы "NMTC" и "SHIELD"). Следует заметить, что с помощью программы "NMTC" не удалось воспроизвести экспериментальные данные по спектрам протонов за мишенями полного поглощения.

В целом проверка показала работоспособность программы "DIAT". Эту программу можно использовать для получения количественной информации о дифференциальных характеристиках полей вторичных излучений.

С помощью апробированной программы "DIAT" было проведе-

но исследование закономерностей формирования нейтронного пучка. В расчете воспроизводились условия получения нейтронного пучка в эксперименте, который выполнен в секторе медпучка ЛЯП ОИЯИ. Исходя из абсолютных значений спектральной плотности потока нейтронов, образующихся в мишени под действием пучка первичных протонов, оценивалась величина поглощенной дозы в тканезквивалентном поглотителе. Расчеты выполнены для мишеней из бериллия, углерода, алюминия, железа, меди и свинца. Рассматривался диапазон толщин мишеней от 5 до 200 г/см<sup>2</sup>. Проведенное исследование показало, что из всех рассмотренных вариантов наибольшее значение поглощенной дозы в тканезквивалентном поглотителе обеспечивает бериллиевая мишень толщиной 60-70 г/см<sup>2</sup>.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Анализ литературных данных показал следующее: экспериментальные данные о функции распределения заряженных частиц, образующихся как в неупругом взаимодействии, так и в результате развития межъядерного каскада, разрозненны, а во многих важных случаях вообще отсутствуют; существующие методы расчета межъядерного каскада в двумерной геометрии не позволяют эффективно получать информацию о дифференциальных характеристиках заряженных частиц за поглотителем. На основании обзора сформулирована задача исследований полей заряженных частиц, генерируемых в мишенях и поглотителях на ускорителях протонов с энергией до нескольких ГэВ.

2. Впервые применен метод последовательных столкновений к расчету межъядерного адронного каскада в двумерной геометрии.

3. На основании этого метода создан комплекс вычислительных программ "САЭС-2", предназначенный для определения характеристик полей как заряженных частиц, так и нейтронов в двумерной геометрии. Программы, входящие в этот комплекс, позволяют производить расчет межъядерного каскада в поглотителях толщиной в продольном направлении до 5 длин свободного пробега адронов, в радиальном - до 3 длин.

4. Проведена апробация программ комплекса с применением экспериментальных данных, полученных как в данной, так и в других работах. Это позволило сделать заключение о возможности использования программ для получения количественной информации о характеристиках полей вторичного излучения.

5. Исследованы закономерности формирования полей заряженных частиц и нейтронов, образующихся в поглотителях под действием первичных протонов с энергией в несколько сотен МэВ.

6. Создан время-пролетный спектрометр заряженных частиц с временным разрешением  $2\tau = 1$  нс. Этот спектрометр позволяет измерять энергетические спектры протонов в диапазоне их энергии от 60 до 1000 МэВ в разнообразных радиационно-значимых ситуациях.

7. Проведено экспериментальное исследование характеристик протонного компонента поля излучений, образующегося в мишенях и поглотителях под действием первичных протонов с энергией 640 МэВ:

а) измерены дифференциальные сечения образования протонов под углом 80° в неупругом взаимодействии первичных протонов с ядрами С, Си, РВ;

б) впервые получены данные о спектральном выходе протонов с боковой поверхности цилиндрических мишеней;

в) впервые измерены в абсолютных единицах спектрально-угловые распределения вторичных протонов за поглотителем толщиной, значительно превышающей ионизационный пробег первичных протонов;

г) получены данные по радиальным распределениям флюенса вторичных частиц на торцевой поверхности свинцового поглотителя.

8. Созданные расчетные коды применены для исследования условий формирования высокоинтенсивного пучка нейтронов, предназначенного для терапевтических целей. Результаты исследования используются при разработке терапевтического комплекса Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

9. Дальнейшие исследования полей вторичного излучения, генерируемого в мишенях и поглотителях на ускорителях протонов, целесообразно развивать в следующих направлениях:

а) получение новых и уточнение имеющихся экспериментальных данных о дифференциальных сечениях образования частиц в неупругих адрон-ядерных взаимодействиях;

б) исследование спектрально-угловых и пространственно-энергетических распределений адронов за поглотителями толщиной в несколько длин свободного пробега и более в широком диапазоне энергий первичных частиц;

в) совершенствование методов спектрометрии адронов в широком диапазоне их энергий; развитие время-пролетной методики в направлении достижения одновременной спектрометрии нейтронов, протонов и  $\pi^{\pm}$ -мезонов (с применением других спектрометрических методов).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Е.К.Гельфанд, А.Я.Серов, Б.С.Сычев. Метод последовательных столкновений для расчета защиты от излучений ускорителей. - Труды Радиотехнического института АН СССР, № 20, М., 1974, с.136-146.

2. А.Я.Серов, Б.С.Сычев. Спектрометр по времени пролета для измерения энергетических распределений заряженных частиц с энергией до 1 ГэВ. - Труды Радиотехнического института АН СССР, № 25, М., 1976, с.176-179.

3. А.Я.Серов, Б.С.Сычев. Экспериментальные исследования спектрально-угловых распределений вторичных заряженных частиц, возникающих в толстых мишенях под действием протонов с энергией 635 МэВ. - В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т. I, М., "Наука", 1977, с. 210-212.
4. А.Я.Серов, Е.К.Гельфанд, Б.С.Сычев. Расчет поля излучений, инициируемых в веществе узким пучком протонов высокой энергии. - В кн.: Тезисы докладов Второй всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. М., изд. МИФИ, 1978, с. 28.
5. А.Я.Серов, Б.С.Сычев. Измерение энергетического спектра вторичных протонов за толстым свинцовым поглотителем при облучении его протонами с энергией 635 МэВ. - "Атомная энергия", 1978, т. 45, вып. 3, с. 235.
6. Е.К.Гельфанд, Б.В.Манько, А.Я.Серов, Б.С.Сычев. Комплекс программ для расчета полей излучений за плоскими защитными экранами, бомбардируемыми нуклонами высокой энергии. - "Вопросы дозиметрии и защиты от излучений". Под ред. В.К.Сахарова. Вып. 18, М., Атомиздат, 1979, с. 160-163.
7. А.Я.Серов, Б.С.Сычев, С.И.Ушаков, Е.П.Череватенко. Исследование поля вторичных излучений за свинцовым поглотителем при его облучении пучком протонов с энергией 640 МэВ. Препринт ОИЯИ Р16-12765. Дубна, 1979; - "Атомная энергия", 1980, т. 49, вып. 2, с. 123-124.
8. А.Я.Серов, Б.С.Сычев, Е.П.Череватенко. Исследование выхода нейтронов из толстых мишеней под действием протонов с энергией 645 МэВ. Препринт ОИЯИ 18-80-540. Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 сентября 1982 года.