

T-417

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.1.074

16-86-539

ТИМОШЕНКО

Геннадий Николаевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЕЙ НУКЛОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ И СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ

Специальность: 01.04.01. - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1986

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор
кандидат физико-математических наук

Л. Н. Зайцев
В. Е. Алейников

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

Р. Я. Зулкарнеев
Б. С. Сычев

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Институт физики высоких энергий (Серпухов).

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1986 г.
в _____ часов на заседании специализированного Совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1986 г.

Ученый секретарь специализированного Совета М. Ф. Дихачев

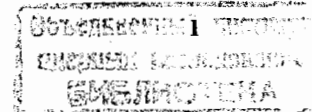
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С развитием ускорителей протонов и ядер на высокие энергии возрастает значение вопросов создания надежной и экономически оправданной защиты персонала и адекватного измерения за ней эквивалентной дозы излучения. Заметное различие результатов расчетов защиты, выполненных различными методами, делает актуальными экспериментальные проверки корректности расчетов. Особенно важны базовые (комплексные) эксперименты, обладающие полнотой информации и выполненные в относительно простых и типичных для ускорителей геометриях. По интегральным характеристикам полей излучения на протонных ускорителях к настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных, однако для проверок методов расчета защит более ценными являются данные о дифференциальных характеристиках полей. Сведения же о спектрально-угловых распределениях нуклонов высокой энергии из толстых мишеней (имитирующих детали ускорителей при облучении), и особенно за реальными защитами, весьма ограничены.

На ускорителях релятивистских ядер поля излучений вокруг толстых мишеней и за защитами практически не изучены. Недостаточно экспериментальных данных и о двойных дифференциальных сечениях образования адронов в А-А взаимодействиях при энергиях ядер-снарядов несколько ГэВ/нуклон. Подобная информация важна также для прогнозирования радиационной обстановки на борту космических пилотируемых аппаратов, обусловленной галактическим излучением.

Эквивалентная доза излучения за сплошными защитами ускорителей на высокие энергии определяется нуклонами широкого диапазона энергий, причем до 50-70% вклада в дозу могут давать нейтроны с энергией более 20 МэВ. Это обуславливает актуальность создания высокочувствительной методики измерения флюенсов и доз нейтронов высоких энергий. Данные о заряженном компоненте полей излучения за защитами важны для определения его вклада в показания дозиметров нейтронов, основанных на регистрации протонов отдачи, и, соответственно, для повышения достоверности дозиметрического контроля на ускорителях.

Цель работы состояла в комплексном изучении дифференциальных и интегральных характеристик полей нуклонов высокой энергии, возникающих при взаимодействии излучения ускорителей протонов и ядер с толстыми мишенями и биологическими защитами.



Научная новизна и практическая ценность

Измерены спектры нейтронов из толстой мишени, облучаемой ядрами ^{12}C , и получены сравнительные данные по угловым распределениям заряженных частиц, генерируемых в толстых мишенях пучками протонов, α -частиц и ядер ^{12}C на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ на энергию 10 ГэВ.

За защитой синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ на энергию 0,68 ГэВ в двух геометриях "источник-защита" получены данные об интегральных и дифференциальных характеристиках полей излучения (компонентный состав, пространственные распределения флюенсов нуклонов, угловые зависимости выходов и спектры протонов), которые в совокупности с информацией об источниках падающего на защиту излучения могут интерпретироваться как результаты базового эксперимента по физике защиты на ускорителях.

Данные экспериментов на синхроциклотроне и синхрофазотроне позволили установить погрешности расчетных методик, предназначенных для проектирования защит каналов транспортировки пучков релятивистских протонов и легких ядер.

Подтвержден экспериментально вывод о том, что причиной значительного завышения показаний индивидуальных фотографических дозиметров нейтронов (ИФК_H) в жестких полях излучения за сплошной защитой ускорителей являются протоны. Оценена точность коррекции показаний ИФК_H , основанной на разделении треков в эмульсии на "черные" и "серые" с порогом разделения по энергии протонов 50 МэВ; определен вклад протонов в показания дозиметра нейтронов ДН-А-1 и углеродсодержащих активационных детекторов, используемых в дозиметрических измерениях.

Измерен спектр "примесных" протонов в нейтронном пучке синхроциклотрона на выходе в экспериментальную лабораторию, что позволяет повысить методическую точность измерений на пучках нейтронов высоких энергий.

Разработан и внедрен в практику дозиметрических измерений на синхрофазотроне высокочувствительный потокомер-дозиметр нейтронов высоких энергий, предназначенный для работы в полях смешанного излучения за защитами ускорителей.

Автор выносит на защиту:

1. Разработку и создание экспериментальных установок для измерений интегральных и дифференциальных характеристик полей нуклонов высоких энергий вблизи мишеней и за защитами ускорителей, в частности: спектрометра нейтронов по времени пролета, ΔE -спектрометра протонов, потокомера-дозиметра нейтронов.

2. Результаты комплексных измерений дифференциальных характеристик полей вторичного излучения вблизи толстых мишеней, облучаемых протонами,

α -частицами и ядрами ^{12}C с энергиями 3,65 ГэВ/нуклон.

3. Базовый эксперимент по измерению интегральных и дифференциальных характеристик полей излучения за защитой, на которую падает пучок протонов с энергией 0,64 ГэВ или вторичное излучение, генерируемое им в толстой мишени.

4. Результаты сравнения показаний дозиметров нейтронов в полях излучений за защитой со значениями эквивалентной дозы, определенными на основе измеренных спектров нуклонов.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на научно-методических семинарах Отдела радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ; на семинарах подсекции "Радиационная защита и работа в условиях высоких уровней ионизирующего излучения" при Совете по проблемам ускорения заряженных частиц АН СССР (Одесса, 1975; Гатчина, 1978; Сухуми, 1980; Протвино, 1981); на X и XI Международной зимней школе по физике защиты от излучений (ГДР, Гауссиг, февраль 1978; февраль 1979); на IX Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1984); на I7 Международном симпозиуме по физике радиационной защиты (ГДР, Дрезден, 1985).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 12 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения; содержит 171 страницу текста, в том числе 60 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 131 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности и важности исследуемых проблем и изложены основные подходы к решению задач физики защиты на ускорителях высоких энергий.

В первой главе содержится краткий обзор литературных данных и формулируется цель работы.

Во второй главе описаны эксперименты по измерению угловых распределений заряженных частиц из толстых мишеней, облучаемых протонами, α -частицами и ядрами ^{12}C с энергиями 3,65 ГэВ/нуклон. Мишенями служили медный ($\varnothing 100 \times 130$ мм) и свинцовый ($\varnothing 100 \times 170$ мм) цилиндры, установленные в фокусе пучка (свинцовая мишень эквивалентна медной по числу неупругих взаимодействий ядер ^{12}C на её толщине). Мониторинг пучков осуществлялся ионизационной камерой (МК). Калибровка МК на пучках ^{12}C , α и p выполнялась счетным методом с помощью пучкового телескопа счетчиков и активационными детекторами. В ходе измерений на пучках α -частиц и ядер ^{12}C контролировалось содержание в пучках примесных частиц. Выходы заряженных частиц из мишеней измерялись телескопом сцинтилляционных счетчиков с угловым разрешением $0,6^\circ$ и энергетическими порогами для p и π - 42 и 18 МэВ соответственно.

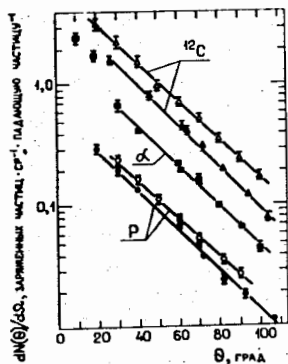


Рис.1. Угловые зависимости выходов заряженных частиц из толстых медной (Φ , Φ , Δ) и свинцовой (Φ , Δ) мишеней, облучаемых p , α ^{12}C с энергиями 3,65 ГэВ/нуклон.

скими ядрами.

Третья глава посвящена измерениям методом времени пролета спектров нейтронов с энергиями более 10 МэВ, генерируемых в толстой медной мишени ядрами ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон. В спектрометре по времени пролета в качестве "стартового" использовался импульс первого из двух счетчиков телескопа, размещенного в пучке ядер перед мишенью. Пучковый телескоп регистрировал также абсолютное число ядер, прошедших на мишень. Интенсивность выведенного пучка составляла $5 \cdot 10^4 \pm 10^5$ ядер/цикл при временной растяжке пучка 450 мс. Пороги счетчиков пучкового телескопа были установлены на уровне 0,2 и 0,8 от наиболее вероятной амплитуды импульсов от ядер ^{12}C (высокий порог дискриминации второго счетчика выставлялся для режекции примесных частиц в пучке). Сигнал "Стоп" формировался нейтронным счетчиком на основе пластического сцинтиллятора с порогом регистрации 0,72 МэВ ЭЭЭ (эквивалентной энергии электрона). Эффективность счетчика к нейтронам рассчитывалась методом Монте-Карло. Для запрета регистрации счетчиком заряженных частиц перед ним и снизу от него (под углом 45°) устанавливались два счетчика антисовпадений. Логика работы спектрометра с запуском от каждого падающего на мишень ядра такова, что для соблюдения причинно-следственной связи между событиями "Старт" и "Стоп" необходимо было

Угловые зависимости выходов заряженных частиц из мишеней, нормированные на одну частицу пучка, приведены на рис.1. Характерной является слабая зависимость формы угловых распределений от атомных весов ядер-снарядов и ядер-мишеней. Это обусловлено тем, что в толстых мишенях особенно сильно нивелируются межъядерным каскадом и ионизационными потерями энергии. Отношения выходов вторичных частиц, вылетающих под различными углами из толстых мишеней, облучаемых протонами и легкими ядрами с эквивалентной энергией на нуклон, определяются, главным образом, атомными весами ядер-снарядов. Это позволяет использовать данные о дифференциальных по углу характеристиках полей вторичного излучения из толстых мишеней на высокоэнергетических ускорителях для оперативной оценки аналогичных характеристик полей, возникающих при бомбардировке толстых мишеней релятивистскими ядрами.

регистривать в качестве "стартовых" только те события, которые отделены друг от друга на интервал, больший временного диапазона $t-A$ преобразователя, для чего в канале "Старт" проводился соответствующий отбор.

Фоновые события в нейтронном счетчике обусловлены, в основном, двумя процессами. Первый источник фона – ложные события "Стоп", некоррелированные во времени с событиями "Старт". Доля таких событий не превышала 7% от общего числа, и они были почти равномерно распределены в исследуемом временном диапазоне. Более значительным источником фона явились ложные события "Стоп", коррелированные во времени с событиями "Старт", т.е. регистрация нейтронным счетчиком частиц и γ -квантов, образованных вторичным излучением из мишени в веществе пола, стен и оборудования экспериментального зала. Для его устранения под каждым углом проводились дополнительные измерения с "теневым" поглотителем из железа толщиной 80 см, устанавливавшимся посередине пролетной базы. Доля таких событий составила 40–50%.

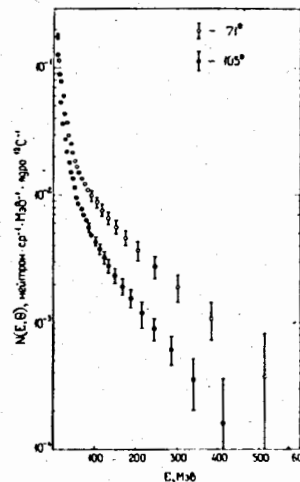


Рис.2. Спектры нейтронов, вылетающих под углами 71° и 105° из толстой медной мишени, облучаемой ядрами ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.

Энергетические спектры нейтронов восстанавливались из результирующих аппаратных спектров методом статистической регуляризации. Для проверки метода восстановления были выполнены математические эксперименты по восстановлению тестовых спектров. Спектры нейтронов, нормированные на одно упавшее на мишень ядро ^{12}C , представлены на рис.2. Оба спектра имеют существенные подъемы в низкоэнергетической области, связанные с хвостами энергетических распределений испарительных нейтронов и с мягкими каскадными нейтронами. Выходы нейтронов с $E \geq 10$ МэВ под углами 71° и 105° составляют соответственно $(3,8 \pm 0,4)$ и $(2,5 \pm 0,2)$ нейтрон / (сп. ^{12}C).

Глава 4 содержит описание экспериментов по исследованию угловых распределений потоков протонов в полях излучений за защитами ускорителей ОИЛИ. Изложены методика и геометрия экспериментов на

синхроциклотроне ЛЯП. Для измерений использовался сцинтилляционный телескоп счетчиков, вращавшийся в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно выбранной на поверхности защиты точки. На синхроциклотроне измерения проводились за сплошной 2-метровой бетонной за-

щитой в двух геометриях "источник-защита". В первой геометрии пучок протонов с энергией 0,64 ГэВ падал на защиту под углом $30,5^\circ$ относительно нормали к ней. Во второй геометрии в пучке устанавливалась на расстоянии 4,7 м от защиты толстая медная мишень ($\varnothing 120 \times 300$ мм); на защиту же падало вторичное излучение, генерируемое протонами в мишени (модель плоского мононаправленного источника излучения). Угловая зависимость плотности потока протонов определялась в трех точках на внешней поверхности защиты. Измерялись скорости счета телескопа при вращении его на углы Θ и Ψ в сферической системе координат, совмещенной с исследуемой точкой.

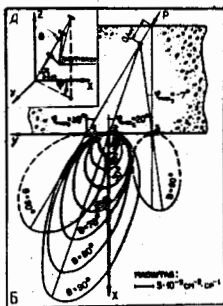


Рис.3. Диаграммы направленности потоков протонов за 2-метровой бетонной защитой, на которую падает пучок протонов с энергией 0,64 ГэВ.

На рис.3 представлены для примера диаграммы направленности потоков протонов в зависимости от углов для 3 точек в геометрии I. Характер угловых распределений указывает на наличие в защите на глубине, примерно равной пробегу протонов до неупругого взаимодействия, "эффективного" источника нейтронов, формирующего в последних слоях защиты протонный компонент поля. Большие значения выходов протонов в т.2 по сравнению с т.1 объясняются тем, что расстояния от места рождения нуклонов на большей части "стержня" межъядерного каскада до т.2 меньше, чем до т.1, что эквивалентно меньшей толщине защиты в направлении т.2. В то же время, из-за того, что доля высокоэнергетичных нуклонов, выходящих из "стержня" каскада, уменьшается с увеличением угла вылета, абсолютное значение выхода протонов в т.3 меньше, чем в т.1 и 2, хотя толщина защиты в направлении т.3 минимальна. В геометрии 2 значения выходов протонов во всех точках существенно меньше и вид угловых рас-

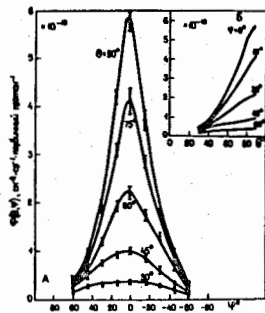


Рис.4. Угловое распределение потоков заряженных частиц за бетонной защитой, на которую нормально падает излучение, генерируемое в толстой мишени пучком релятивистских протонов.

пределений примерно тот же, хотя "эффективного" источника в глубине защиты в этом случае не наблюдается. В обеих геометриях измерялись также пространственные распределения флюенсов нуклонов с $E > 20$ МэВ на внешней поверхности защиты. Вклад протонов во флюенс нуклонов в т.2 составил в геометрии I $-(11,1 \pm 2,2)\%$, в геометрии 2 $-(3,8 \pm 0,8)\%$. Аналогичным образом было измерено угловое распределение протонов на обваловке за северо-западной стеной синхроциклотрона, на которую снизу под углом $\sim 20^\circ$ падало излучение из камеры ускорителя. Доля протонов составила $(4,2 \pm 0,8)\%$.

На синхрофазотроне ЛВЭ измерения проводились за 2- и 3-метровыми боковыми защитами, облучаемыми вторичными частицами, вылетающими под углами $40^\circ + 60^\circ$ из толстой медной мишени, бомбардируемой релятивистскими протонами и α -частицами. На рис.4 приведено угловое распределение заряженных частиц за 2 метрами бетона, нормированное на один упавший на мишень протон; вклад заряженного компонента во флюенс адронов составил в этом случае $(6,2 \pm 0,9)\%$.

Несмотря на различия в геометриях и источниках вторичного излучения (например, на синхроциклотроне и синхрофазотроне) формы угловых распределений протонов за их защитами, в целом, подобны. Это связано с тем, что при толщинах защит более $3 \div 4$ длин пробегов нейтронов до неупругого взаимодействия имеет место квазиравновесный процесс формирования поля излучения внутри защиты, и вид угловых распределений нуклонов становится до известных пределов малочувствительным как к энергии вторичного излучения, так и к толщине защиты.

Предложено простое выражение для дифференциальной по углу плотности потока протонов за защитами, хорошо описывающее экспериментальные результаты. Форма угловых распределений определяется значением характеристического угла ω° , составляющего $(30 \pm 10)^\circ$ для всех измерений, в которых источник падающего на защиту излучения близок к плоскому мононаправленному источнику. Это свидетельствует о том, что предложенная аппроксимация носит достаточно общий характер. Литературные данные дают основания полагать, что угловые распределения нейтронов имеют подобную форму (с несколько большим значением ω°).

В главе 5 описаны исследования спектрально-угловых распределений протонов за защитой синхроциклотрона ЛЯП. Этот цикл измерений дополняет исследования угловых распределений и выполнен в тех же геометриях "источник-защита". Приводится описание сцинтилляционного спектрометра, основанного на определении энергии протонов по их потерям в тонком детекторе. Спектрометр состоял из пролетных счетчиков телескопа и ΔE -счетчика с детектором из $CsJ(Te)$ толщиной $1,09$ г/см²; угловое разрешение $- 5,5^\circ$. Так как для низкоэнергетичных протонов зависимость их энерговыведений в ΔE -детекторе от энергии неоднозначна, то электронной

схемой обеспечивалась работа спектрометра только на "пролетной" части его характеристики. Нижний порог энергии протонов, регистрируемых спектрометром, составил ~ 40 МэВ. Верхняя граница энергетического диапазона спектрометра определялась его аппаратным разрешением, обусловленным, в первую очередь, флуктуациями потерь энергии в ΔE -детекторе и составила в нашем случае $400 + 450$ МэВ.

Градуировка спектрометра проводилась с использованием реакции упругого $P-P$ рассеяния протонов пучка на тонкой полиэтиленовой мишени. Для подавления фоновых событий от рассеяния протонов на углероде, в установке на совпадения со спектрометром включался дополнительный телескоп счетчиков, размещенный под сопряженным углом к пучку. Уровень режески спектрометра был подобран при энергии упругих протонов 40,5 МэВ.

Спектры протонов восстанавливались методом статистической регуляризации. При восстановлении спектров протонов из аппаратных распределений использовались расчетные функции отклика спектрометра к моноэнергетическим протонам, хорошо согласующиеся с полученными экспериментально при градуировке. Восстановление тестовых спектров показало, что при корректно определенных функциях отклика спектры протонов, восстанавливаемые по показаниям спектрометра, можно интерпретировать как истинные. Всего в обеих геометриях под различными углами к защите было измерено 9 спектров протонов. На рис. 5 в т. I и т. 3, представлены для примера спек-

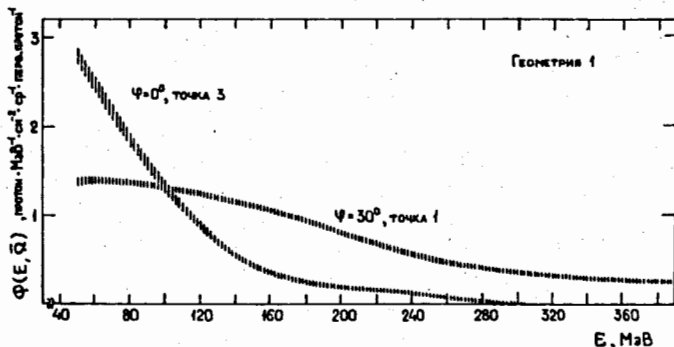


Рис. 5. Спектры протонов за 2-метровой бетонной защитой в точках I и 3 при падении на неё пучка протонов с энергией 0,64 ГэВ (см. рис. 3).

более "жестким" спектром является спектр протонов в направлении, совпадающем с максимумом функции углового распределения потоков протонов в этой точке. Для спектров характерно наличие максимума в области низких энергий, причем с ростом "жесткости" спектров максимум сдвигается в сторону больших энергий. Несмотря на то, что толщина защиты в направлении падающего на неё пучка максимальна (т. I), спектр протонов в этом

направлении формируется преимущественно за счет квазиупругих процессов и является наиболее "жестким" из всех измеренных (рис. 5). Следует отметить также, что максимальное значение флюенса протонов в какой-либо точке за защитой само по себе не свидетельствует, в общем случае, о наибольшей "жесткости" спектров в данной точке (например, т. I и т. 2 в геометрии 2).

Совокупность данных об интегральных и дифференциальных характеристиках полей излучения за 2-метровой защитой синхроциклотрона, изложенных в предыдущей и настоящей главах, позволяет интерпретировать выполненный комплекс измерений как базовый эксперимент по физике защиты.

В главе 5 описаны также измерения углового распределения и спектра "примесных" протонов в нейтронном пучке синхроциклотрона ЛЯИ. Нейтроны, вылетающие из бериллиевой мишени, облучаемой пучком протонов, выводились через 4-метровый коллиматор в экспериментальный зал. Заряженные частицы из мишени отклонялись магнитным полем ускорителя и в коллиматор не попадали. Примесь заряженных частиц (в основном, протонов) на выходе коллиматора обусловлена взаимодействием нейтронов со стенками коллиматора. Измерения углового распределения заряженных частиц позволило определить их флюенс на выходе коллиматора. Вклад "примесных" заряженных частиц ($E > 40$ МэВ) во флюенс нейтронов с $E > 30$ МэВ составил 0,64%. ΔE -спектрометром был измерен спектр протонов, летящих вдоль коллиматора. Вследствие того, что "примесные" протоны образуются, в основном, в реакциях с практически полной передачей протону энергии нейтрона, спектр протонов качественно повторяет форму спектра нейтронов, но сдвинут в сторону меньших энергий, и максимумы имеют более протяженный характер. Полученные результаты использовались при обработке результатов измерений реакций дозиметров в пучке нейтронов высоких энергий.

В главе 6 рассматривается влияние протонного компонента полей рассеянного излучения за защитами ускорителей на показания индивидуальных фотографических дозиметров нейтронов ИФК_н, промышленных дозиметров нейтронов ДН-А-1 и углеродсодержащих активационных детекторов, используемых для определения флюенса нейтронов с энергией более 20 МэВ. Считается, что причиной значительного завышения показаний ИФК_н в "жестких" полях излучения на ускорителях является протонный компонент, регистрируемый ИФК_н со значительно большей эффективностью, чем нейтроны. На основе данных о спектрах нуклонов за 2-метровой защитой синхроциклотрона было определено количество треков от протонов и нейтронов и значения истинной и "кажущейся" дозы ИФК_н. Полученные результаты сравнивались с показаниями ИФК_н в реальном поле. Облученные пленки с целью кор-

рекции их показаний просматривались по методике разделения треков на "серые" и "черные" с порогом разделения по энергии протонов 50 МаВ. Экспериментально установлено, что 4-10% вклад протонов во флюенс нуклонов приводит к завышению "кажущейся" дозы более чем на порядок; применение же указанного метода коррекции позволяет измерять истинную дозу нейтронов с точностью до коэффициента 1,5.

В "жестких" полях излучения дозиметр ДН-А-1 также завышает значение эквивалентной дозы нейтронов, однако отношение "кажущейся" дозы к суммарной дозе нуклонного излучения не превышает 2 даже в геометрии I, где доза от протонов становится сравнимой с дозой от нейтронов.

При определении флюенса нейтронов углеродсодержащими детекторами следует учитывать завышение их показаний за счет протонов. Так, в геометрии I это завышение составляет 20%.

В главе 7 описана конструкция и принцип действия потокомера-дозиметра нейтронов (ПДН), предназначенного для измерения флюенса и эквивалентной дозы нейтронов высоких энергий (более $10 + 20$ МаВ) в полях смешанного излучения за защитами ускорителей. В дозиметрии известен принцип линейной суперпозиции показаний нескольких детекторов для определения дозы излучения. Методика определения флюенса и дозы с помощью ПДН основана на сходном принципе, но вместо показаний нескольких детекторов используется набор показаний одного детектора при различных его чувствительностях к нейтронам широкого спектра энергий. В качестве дозиметра использован сцинтилляционный счетчик, у которого эффективность регистрации нейтронов $\mathcal{E}(E)$ зависит от порога регистрации импульсов j . Это позволило подобрать функцию квазичувствительности дозиметра $\lambda(E)$ в виде линейной комбинации $\mathcal{E}_j(E)$, близкую к энергетической зависимости максимальной удельной дозы нейтронов $h_n(E)$. Доза от спектра нейтронов определяется, таким образом, через линейную комбинацию показаний ПДН при различных порогах регистрации нейтронов. Аналогично измерение флюенса нейтронов осуществляется при функции квазичувствительности прибора, постоянной во всем его энергетическом диапазоне.

Детектор нейтронного счетчика S_n - пластический сцинтиллятор диаметром и высотой 120 мм. Для режекции заряженных частиц нейтронный детектор окружен охранным сцинтиллятором счетчика \bar{S} . Сигнал S_n анализируется при отсутствии сигнала совпадений $S_n + \bar{S}$. Режекция γ -квантов не производится, ввиду высоких порогов регистрации S_n , используемых при обработке показаний ПДН. Расчет эффективностей S_n проводился методом Монте-Карло. При расчетах $\mathcal{E}_j(E)$ учтено влияние \bar{S} на эффективность S_n , выражающееся в ложных срабатываниях \bar{S} от протонов, рожденных нейтронами в S_n и вышедших за его пределы. Этот эффект приводит к заметному уменьшению $\mathcal{E}_j(E)$ при энергиях нейтронов более 100 МаВ. Проверка расчетов $\mathcal{E}_j(E)$ проводилась в поле излучения (Pu-Be)-источника

нейтронов и в поле нейтронов из реакции $T(d,n)^4He$. Наблюдалось хорошее согласие расчетов и экспериментов при измерениях как эффективностей, так и аппаратных спектров в двух геометриях (падение нейтронов на торец и на боковую поверхность S_n). Набор информации производился с помощью анализатора, шкала которого градуирована в ЭЭЭ. Под показанием ПДН при j -м пороге регистрации понимается суммарное число событий в аппаратном спектре, начиная с канала, соответствующего j -му порогу, выраженному в ЭЭЭ.

Приведены результаты сличений данных ПДН с показаниями углеродсодержащих активационных детекторов в полях за сплошными защитами синхротрона ЛВЭ. Для корректности сличения функция квазичувствительности прибора моделировала энергетическую зависимость сечения реакции $^{12}C(n,2n)^{13}C$. В условиях преимущественно бокового облучения ПДН получено хорошее согласие по флюенсу нейтронов с энергией более 20 МаВ. В условиях, когда излучение падало на ПДН преимущественно сверху, различие в результатах двух методик составило 24%.

С практической точки зрения важной характеристикой прибора является минимальный флюенс (доза) нейтронов, который можно достоверно измерить. Такая оценка проводилась при измерениях флюенса нейтронов, обусловленных космическим излучением, внутри массивного железного бокса, с толщиной верхнего перекрытия $\sim (2 + 2,5) \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Флюенс нейтронов во внутренней полости бокса много меньше флюенса мюонов, вследствие чего чувствительность ПДН ограничивалась в данных измерениях неэффективностью запрета счетчиком \bar{S} регистрации заряженных частиц. Оценки показали, что нижняя граница применимости прибора при измерении флюенса нейтронов составляет $3 + 4 \text{ н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Измерения флюенса нейтронов космического происхождения с энергией более 20 МаВ в свободной геометрии вне здания дали значение $70 \text{ н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, что в целом не противоречит литературным данным.

В заключении сформулированы основные результаты выполненной работы:

1. Создан набор аппаратуры для измерения характеристик полей нуклонов высоких энергий вокруг мишеней и за защитами ускорителей:
 - средства мониторинга пучков протонов и легких ядер;
 - системы сцинтилляционных счетчиков для измерений угловых распределений заряженных частиц;
 - спектрометр нейтронов по времени пролета;
 - ΔE -спектрометр протонов;
 - потокомер-дозиметр нейтронов.
2. Выполнены комплексные измерения угловых зависимостей выходов заряженных частиц и спектров нейтронов из толстых медной и свинцовой мишеней, облучаемых протонами, α -частицами и ядрами ^{12}C с энергиями

ми 3,65 ГэВ/нуклон на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ.

3. Проведен базовый эксперимент по физике защиты на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ; установлены закономерности формирования дифференциальных характеристик полей протонов за защитами синхроциклотрона и синхрофазотрона ОИЯИ.
4. Определен вклад протонов в показания ИФК_н, дозиметра нейтронов ДН-А-1 и углеродсодержащих активационных детекторов в жестких полях за сплошной защитой синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ.
5. Получены данные о спектрально-угловом распределении "примесных" протонов в нейтронном пучке синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Тимошенко Г.Н., Алейников В.Е., Хан Г. Сцинтилляционный спектрометр протонов высокой энергии. Kernenergie, v.21, 1978, p. 181-182.
2. Алейников В.Е., Комочков М.М., Крылов А.Р., Тимошенко Г.Н. Измерение угловых распределений потоков протонов, выходящих из защиты синхроциклотрона на энергию 660 МэВ. Препринт ОИЯИ Р16-11891, Дубна, 1978.
3. Алейников В.Е., Комочков М.М., Крылов А.Р., Тимошенко Г.Н., Хан Г. Спектрально-угловые характеристики протонного компонента поля излучения за защитой синхроциклотрона на энергию 660 МэВ. Атомная энергия, т.49, вып.3, с.188-189, 1980.
4. Алейников В.Е., Комочков М.М., Крылов А.Р., Тимошенко Г.Н. Заряженный компонент нейтронного пучка синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ. Депонированная публикация ОИЯИ Б1-16-80-157, Дубна, 1980.
5. Алейников В.Е., Солодилов А.В., Тимошенко Г.Н., Хан Г. Использование счетчика с пластическим сцинтиллятором для определения эквивалентной дозы и флюенса нейтронов с энергией от 10 до 300 МэВ. Препринт ОИЯИ Р16-80-453, Дубна, 1980.
6. Алейников В.Е., Тимошенко Г.Н. Вклад протонов в показания дозиметров ИФК_н, ДН-А-1 и углеродсодержащих детекторов за защитой синхроциклотрона ЛЯП ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ 16-81-103, Дубна, 1981.
7. Алейников В.Е., Солодилов А.В., Тимошенко Г.Н., Хан Г. Исследование функций отклика потокомера-дозиметра нейтронов высокой энергии. Сообщение ОИЯИ 16-82-419, Дубна, 1982.
8. Алейников В.Е., Тимошенко Г.Н. Дифференциальные характеристики полей протонов, образуемых в толстых мишенях и за защитой ускорителей на энергии до 1 ГэВ. Сообщение ОИЯИ 16-82-443, Дубна, 1982.
9. Алейников В.Е., Тимошенко Г.Н. Угловые распределения потоков заряженных частиц из толстой мишени, облучаемой p, α, ¹²C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон. Атомная энергия, т.55, вып.6, с.412-413, 1983.
10. Алейников В.Е., Солодилов А.В., Тимошенко Г.Н. Измерение методом времени пролета спектров нейтронов из толстой медной мишени, облучаемой

мой ядрами ¹²C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон. Препринт ОИЯИ Р16-85-97, Дубна, 1985.

11. Алейников В.Е., Солодилов А.В., Тимошенко Г.Н. Потокомер-дозиметр нейтронов высокой энергии. Препринт ОИЯИ 16-85-34, Дубна, 1985.
12. Крылов А.Р., Ле Ха Тхо, Тимошенко Г.Н. Дифференциальные по углу выходы заряженных частиц из толстой свинцовой мишени, облучаемой релятивистскими протонами и ядрами ¹²C. Сообщение ОИЯИ 16-85-347, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 августа 1986 года.