

A - 459

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

16 - 11883

АЛЕЙНИКОВ
Валерий Евгеньевич

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НУКЛОНОВ
ЗА ЗАЩИТОЙ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОТОНОВ
НА ВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

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

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук М.М. Комочков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В.С. Барашенков

доктор физико-математических наук М.В. Казарновский

Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт

Защита состоится " " _____ 1978 г. в _____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1978 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов

Исследования компонентного состава поля излучения за защитой ускорителей протонов на высокие энергии показали, что поля излучений имеют сложный компонентный и энергетический состав, который зависит от материала и геометрии защиты, однако величину эквивалентной дозы за защитой определяют нуклоны широкого диапазона энергий. Поэтому правильное решение вопроса о том, с какой достоверностью можно измерить эквивалентную дозу имеющимися в распоряжении приборами, или какие методы и приборы следует использовать для этих целей, может быть получено только при наличии информации об энергетических спектрах нуклонов, выходящих из защиты ускорителей. Получение такой информации необходимо также с точки зрения проверки и коррекции способов расчета защиты ускорителей протонов на высокие энергии. Феноменологический анализ результатов разрозненных измерений энергетических спектров нейтронов за защитой ускорителей зарубежных центров, сделанный Р.Томасом в 1972 году по заказу Международного агентства по атомной энергии, позволил сделать только некоторые предположения о влиянии состава защиты на форму спектров. Для установления закономерностей формирования спектров нуклонов за защитой ускорителей необходимы дальнейшие исследования энергетических распределений нуклонов в относительно простых и типичных для ускорителей протонов геометрических источниках - защита.

Основное содержание реферируемой диссертации составляют результаты исследований энергетических распределений нуклонов в полях излучений за защитой ускорителей протонов на высокие энергии Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ). Исследования выполнены с целью установления закономерностей в формировании поля нейтронов, определения адекватности показаний дозиметрических приборов эквивалентной дозе в таких полях, а также экспериментальной проверки способов расчета защиты от излучений ускорителей протонов.

Проблема решается следующим образом:

- а) выбираются и исследуются характеристики приборов для измерения энергетических распределений нуклонов;

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

- б) совершенствуются и реализуются методы восстановления спектров нуклонов по показаниям спектрометров;
- в) исследуются энергетические распределения потоков и доз нуклонов в полях излучения за защитой ускорителей протонов на высокие энергии Объединенного института ядерных исследований;
- г) результаты и методы измерения спектров нуклонов используются для решения важных с прикладной точки зрения задач: установлению адекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе в полях излучений за защитой ускорителей протонов на высокие энергии и проверки методов расчета защиты таких ускорителей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены новые экспериментальные данные об энергетических распределениях нуклонов за защитой ускорителей протонов на высокие энергии в типичных для ускорителей геометриях источников-защита.
2. Выявлены закономерности в формировании энергетических распределений нуклонов за защитой ускорителей протонов на высокие энергии.
3. Измерены функции чувствительности детектора ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ с шаровыми замедлителями к нейтронам в диапазоне энергий от 10^{-2} эВ до 10^3 эВ.
4. Проверена и установлена адекватность показаний, широко используемых в практике дозиметрического контроля на ускорителях приборов и методов, эквивалентной дозе в типичных полях излучения за защитой ускорителей.
5. Разработан метод расчета функции спектрально-углового распределения потоков нейтронов высокой энергии в подубесконечной защите для случая плоского мононаправленного источника нейтронов с энергией в несколько сотен МэВ на границе защиты.
6. Экспериментально установлена точность некоторых методов расчета поля нейтронов за защитой ускорителей протонов на энергии менее 1 ГаВ.

Практическая значимость полученных в диссертации результатов заключается в рекомендациях об адекватности используемых на ускорителях средств дозиметрического контроля и экспериментальном определении точности широко используемых методов расчета защиты ускорителей протонов на энергии менее 1 ГаВ. Результаты работы были использованы при коррекции методики определения эквивалентной дозы в полях излучения за защитой ускорителей ОИЯИ с помощью индивидуального фотодозиметра ИФКН, а также при выборе и интерпретации показаний приборов, используемых для измерений уровней излучений за защитой ускорителей протонов ОИЯИ.

Автор защищает:

1. Выполненную работу по исследованию энергетических распределений нуклонов за защитой ускорителей протонов на высокие энергии. Установленные на основании экспериментальных и расчетных данных закономерности в формировании энергетических спектров нуклонов за защитой ускорителей.
2. Результаты экспериментальной проверки адекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе в полях излучения за защитой ускорителей протонов.
3. Результаты экспериментальной проверки методов расчета характеристик поля излучения за защитой ускорителей протонов на энергии менее 1 ГаВ.

Результаты проведенных исследований отражаются в диссертации, которая состоит из введения, пяти глав, основных результатов, выводов, приложения и заключения. В диссертации помещено 42 рисунка, 9 таблиц, 97 литературных ссылок.

Во введении содержится краткий обзор литературных данных, формулируется цель работы и приводится краткая аннотация основных положений, которые выносятся на защиту.

В первой главе обосновывается выбор приборов для измерений энергетических распределений потоков и доз нуклонов за защитой ускорителей, приведен перечень приборов и описаны спектрометры нейтронов и протонов.

В качестве спектрометра нейтронов использовался сцинтилляционный детектор медленных нейтронов ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ с набором шаровых полиэтиленовых замедлителей, а спектры протонов измерялись сцинтилляционным dE/dx - спектрометром.

Успешное использование детектора ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ с набором шаровых замедлителей для определения спектра нейтронов требует знания зависимости чувствительности детектора с каждым замедлителем от энергии нейтронов. Имеющаяся в литературе экспериментальная информация о функциях чувствительности ограничивается диапазоном энергий от 5 кэВ до 14 МэВ. Расчеты функций чувствительности, выполненные разными авторами, находятся в хорошем согласии с экспериментом и между собой для нейтронов с энергией более 0,1 МэВ, однако наблюдается большое расхождение результатов расчетов для замедлителей небольших диаметров в диапазоне энергий от 0,01 эВ до 10^3 эВ. С целью устранения этой неопределенности была измерена зависимость от энергии нейтронов чувствительности детектора с шаровыми полиэтиленовыми замедлителями с диаметрами 5,08 см (2 дюйма), 7,62 см (3 дюйма), 12,7 см (5 дюймов) и 25,4 см (10 дюймов) в интервале энергий от 10^{-2} эВ до 10^3 эВ методом спектрометрирования энергии нейтронов от импульсного быстрого реактора по времени пролета. В диссертации подробно описана методика эксперимента и приведены результаты измерений функций чувствительности.

Функции отклика dE/dx - спектрометра протонов определялись расчетным путем. Градуировка спектрометра проводилась с помощью пучка протонов с энергией 189 МэВ. Для получения распределений протонов, близких к моноэнергетическим, использовалась реакция упругого p - p рассеяния протонов пучка на водороде CH_2 - мишени. Для проверки соответствия рассчитанных функций чувствительности реальным, аппаратурные спектры от протонов p - p рассеяния, вылетающих из CH_2 - мишени, сравнивались с рассчитанными аппаратурными спектрами.

Во второй главе рассматриваются методы определения энергетических распределений потоков и доз нейтронов.

Восстановление энергетического спектра нуклонов $\Phi(E)$ по показаниям спектрометров сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода относительно функции $\Phi(E)$

$$N(j) + S(j) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} K(E, j) \Phi(E) dE, \quad (1)$$

где

$N(j)$ - количество импульсов, зарегистрированных детектором ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ с j -тым замедлителем (в случае спектрометра нейтронов) или число импульсов в j -том канале анализатора (в случае спектрометра протонов);

$S(j)$ - погрешность в измерении $N(j)$;

$K(E, j)$ - зависимость чувствительности детектора с j -тым замедлителем от энергии нейтронов E (для спектрометра нейтронов) или вероятность регистрации импульса в j -ом канале анализатора при прохождении через спектрометр протона с энергией E (для спектрометра протонов);

E_{\min}, E_{\max} - границы энергетического интервала, в котором восстанавливается спектр нуклонов.

Вообще говоря, уравнение (1) может иметь бесконечное множество решений. Чтобы гарантировать единственность решения задачи восстановления спектра нуклонов, необходимо доопределить её, основываясь на тех или иных представлениях о характере искомого решения, иначе говоря, на априорной информации о спектре нуклонов. В диссертационной работе обсуждаются способы введения дополнительной априорной информации при восстановлении спектров нейтронов широкого диапазона энергий по показаниям детектора медленных нейтронов с набором шаровых замедлителей и углеродсодержащего актива-

ционного детектора. Подробно рассмотрен развитый в диссертационной работе метод восстановления спектров нейтронов с использованием "жесткой" априорной информации о величине потоков нейтронов разных энергетических групп.

Описано применение метода статистической регуляризации для восстановления спектров нуклонов широкого диапазона энергий.

В третьей главе приводятся результаты исследований энергетических распределений потоков и доз нуклонов за защитой протонных ускорителей ОИИИ при энергиях ускоренных протонов 350 МэВ, 480 МэВ, 660 МэВ и 10 ГэВ. Эти исследования проводились в следующей последовательности: определялся выход нейтронов разных энергетических групп за защиту синхроциклотрона на энергию 680 МэВ, измерялись энергетические распределения потоков и эквивалентной дозы нейтронов в зависимости от падающего на защиту спектра нейтронов и композиции защиты, исследовались дифференциальные распределения плотности потоков нуклонов по энергии частиц (энергетические спектры) за боковой защитой синхроциклотрона на энергию 680 МэВ и синхрофазотрона на энергию 10 ГэВ.

Спектры нейтронов были измерены:

1) За сплошной двухметровой бетонной ($\rho \approx 2,35 \text{ г/см}^3$) защитой синхроциклотрона, когда на защиту падало излучение от внутренней бериллиевой мишени и камеры синхроциклотрона при энергиях ускоренных протонов 350 МэВ, 480 МэВ и 660 МэВ.

2) За сплошной двухметровой защитой синхроциклотрона из бетона ($\rho \approx 2,35 \text{ г/см}^3$), на которую падало излучение от "толстой" медной мишени, бомбардируемой выведенными из синхроциклотрона протонами с энергией 660 МэВ.

3) На крыше пристройки к зданию синхроциклотрона вблизи юго-западной защитной стены с оконными проемами.

4) В экспериментальном зале синхроциклотрона.

5) В поле излучения синхрофазотрона при ускорении протонов до энергии 10 ГэВ.

Формирование поля излучения в первом случае близко к условиям плоского мононаправленного источника на границе полубеско-

нечно защитного барьера. В первых двух случаях спектры нейтронов оказались наиболее "жесткими". Третий и четвертый случаи близки к условиям, при которых поле нейтронов формируется за счет многократно рассеянного излучения, прошедшего через проемы в защите. В этих случаях получены наиболее "мягкие" спектры нейтронов. Спектры нейтронов в поле излучения синхрофазотрона на 10 ГэВ соответствуют промежуточным условиям между "мягким" и "жестким" спектрами.

В работе экспериментально установлено увеличение вклада низкоэнергетического компонента в поток нейтронов в защите ускорителей по сравнению с полем нейтронов за защитой. Показано также, что при неизменной геометрии источник-защита "жесткость" энергетических распределений потоков и доз нейтронов h ($h = \Phi_{>20} / \Phi_{<20}$, где $\Phi_{>20}$ и $\Phi_{<20}$ — потоки (дозы) нейтронов с энергией $E > 20$ МэВ и $E < 20$ МэВ, соответственно) за защитой синхроциклотрона увеличивается с ростом энергии ускоренных протонов.

В реферируемой работе на основе анализа полученных экспериментальных данных, расчетов и имеющейся в литературе информации о спектрах нейтронов $\Phi(E)$ за защитой ускорителей показано, что за сплошной защитой функция $E \cdot \Phi(E)$ имеет максимум в области нейтронов высокой энергии. У наиболее "жестких" спектров максимум расположен вблизи 100 МэВ. Положение этого максимума слабо зависит от максимальной энергии ускоряемых протонов и, в основном, определяется геометрией "защита-источник". Проемы в защите приводят к значительному увеличению в спектре нейтронов низких энергий за счет рассеянного излучения, выходящего через эти проемы.

На основе полученной информации об энергетических распределениях нейтронов установлена максимальная неопределенность в эквивалентной дозе нейтронов при измерении за защитой ускорителей в неизвестном спектре прибором, определяющим величину дозы в ограниченном интервале энергий.

В параграфе 3.5 приводятся результаты измерений энергетических спектров протонов, выходящих из железной защиты синхроциклотрона на энергию 680 МэВ вдоль нормали к поверхности защиты в телесный угол 0,002 стерадиан. В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные о спектрах протонов за защитой ускорителей. Известны только предварительные результаты измерений энергетических распределений протонов за защитой 184-дймового

синхроциклотрона в Беркли. В то же время информация о дифференциальных спектрах протонов необходима не только с точки зрения установления степени радиационного риска от этого компонента поля, но, что особенно важно, для проверки методов расчета защиты ускорителей и установления степени адекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе в полях излучений за защитой ускорителей. В диссертации приведены измеренные спектры протонов за "тонкой" (156 г/см^2) и "толстой" ($\sim 3000 \text{ г/см}^2$) железной защитой синхроциклотрона на энергию 680 МэВ. Спектр протонов за "тонкой" защитой — характерный спадающий спектр вторичных протонов, образованных в "толстой" мишени. За "толстой" защитой наблюдается слабое изменение функции $\Phi(E)$ распределения дифференциальной плотности потока протонов при энергии частиц от 50 до 200 МэВ. Малая величина производной функции $\Phi(E)$ обусловлена, в основном, двумя конкурирующими эффектами: преимущественным рождением низкоэнергетических протонов в нуклон-ядерных взаимодействиях и уменьшением вероятности вылета из защиты заряженных частиц с уменьшением их энергии.

Четвертая глава посвящена важному для практической дозиметрии вопросу: экспериментальной проверке адекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе в полях излучения за защитой ускорителей протонов на высокие энергии. На практике максимальная эквивалентная доза оценивается по результатам измерения уровней излучения и индивидуального дозиметрического контроля. Интерпретацию показаний каждого используемого в измерениях прибора приходится проводить с учетом различных факторов, существенных для данного прибора и зависящих от энергетической, временной и компонентной структуры поля излучения. С целью установления степени достоверности результатов, получаемых при оперативных измерениях уровней ионизирующих излучений и, в частности, эквивалентной дозы нейтронов, а также для критической оценки различных способов дозиметрии нейтронов были выполнены измерения эквивалентной дозы одиннадцатью методами и приборами в полях излучения, типичных для условий работы персонала на ускорителях. Для измерений доз излучения применялись широко используемые для дозиметрии излучений ускорителей приборы: детекторы (сцинтилляционные, активационные и ионизационные) медленных нейтронов с замедлителями, сцинтилляционный дозиметр ДН-А-1, активационный углеродсодержащий

детектор, тканезквивалентная ионизационная камера (работающая в режиме насыщения и в режиме рекомбинации ионов), индивидуальные фотодозиметры. Измерения выполнялись в условиях максимально "жесткого", "мягкого" и промежуточного спектров нейтронов. За наиболее вероятную эквивалентную дозу нейтронов с энергией менее 20 МэВ принималась доза, полученная с помощью соотношения

$$D = \int_{0,01 \text{ МэВ}}^{20 \text{ МэВ}} \eta(E) \Phi(E) dE, \quad (2)$$

где $\eta(E)$ — коэффициент перехода от плотности потока моноэнергетических нейтронов, падающих на тканезквивалентный фантом, к эквивалентной дозе в максимуме глубинного распределения эквивалентной дозы для спектра нейтронов $\Phi(E)$, измеренного в месте сравнения показаний приборов. За наиболее вероятную полную эквивалентную дозу излучения принималась величина дозы, измеренная рекомбинационным дозиметром.

Сравнение результатов измерений эквивалентной дозы с помощью приборов, широко используемых для оперативного контроля радиационной обстановки за защитой ускорителей и, в частности, за защитой ускорителей протонов Объединенного института ядерных исследований с наиболее вероятной величиной эквивалентной дозы показало, что эти приборы воспроизводят эквивалентную дозу нейтронов и полную эквивалентную дозу излучения с точностью коэффициента 2. Эквивалентная доза, определенная по показаниям дозиметров с детекторами, регистрирующими нейтроны по протонам отдачи, может значительно превышать наиболее вероятную дозу в полях излучения, где вклад в дозу релятивистских нейтронов ($E > 20 \text{ МэВ}$) значителен. Это, в частности, относится к методу индивидуального фотодозиметра нейтронов (ИФКН) и прибору ДН-А-1. В диссертации подробно обсуждаются причины неадекватности показаний дозиметров эквивалентной дозе в полях излучения за защитой ускорителей.

Недостаточность информации о взаимодействии излучения высокой энергии с ядрами вещества защиты и использование упрощающих допущений в вычислительных методах приводят к тому, что результаты расчетов характеристик поля излучения за защитой ускорителей, выполненные разными методами, могут существенно отличаться. Результаты расчетов и экспериментальной проверки методов расчета поля нейтронов за защитой ускорителей протонов на энергии менее 1 ГэВ, приводятся в пятой главе.

Большой класс задач, возникающих при решении проблем радиационной защиты ускорителей протонов на высокие энергии, сводится к определению функции распределения плотности потока нейтронов в полубесконечной гомогенной защите с плоским мононаправленным источником релятивистских нейтронов на ее границе. Если пренебречь вкладом, который вносят заряженные частицы в развитие ядерного каскада в веществе, т.е. ограничиться рассмотрением источников нейтронов с энергией менее 1 ГэВ, то задача нахождения этой функции сводится к решению интегродифференциального уравнения:

$$\omega \frac{\partial F(x, E, \omega)}{\partial x} + \mu(E)F(x, E, \omega) = 2\pi \int_{-1}^1 d\omega' \int_E^{E_0} \mu(E')K\left(\frac{E'-E}{\omega-\omega'}\right) F(x, E', \omega') dE' \quad (3)$$

с граничным условием

$$F(0, E, \omega) = F_0(E)\delta(\omega-1),$$

где

- $F(x, E, \omega)$ — функция распределения плотности потока нейтронов;
- x — толщина защиты вдоль нормали к ее поверхности;
- ω — косинус угла между импульсом нейтрона и нормалью к поверхности защиты;
- E — энергия нейтронов;
- E_0 — максимальная энергия нейтронов источника;
- $\mu(E)$ — полное макроскопическое сечение неупругого взаимодействия нейтронов с ядрами вещества защиты;
- $K\left(\frac{E'-E}{\omega-\omega'}\right)$ — двойное дифференциальное распределение нейтронов, образующихся при взаимодействии нейтрона с ядром.

В диссертационной работе получено решение уравнения (3) в виде ряда для моноэнергетического источника нейтронов с энергией E_0 :

$$F(x, E, \omega) = \frac{1}{\omega} e^{-\frac{\mu(E)}{\omega}x} \delta(E-E_0)\delta(\omega-1) + 2\pi \frac{\mu(E_0)K\left(\frac{E_0-E}{1-\omega}\right)}{\omega\mu(E_0)-\mu(E)} \left(e^{-\frac{\mu(E)}{\omega}x} - e^{-\frac{\mu(E_0)}{\omega}x} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (2\pi)^{n+1} \int_{-1}^1 d\omega_1 \dots \int_{-1}^1 d\omega_n \int_E^{E_0} dE_1 \dots \int_E^{E_0} dE_n \dots \int_E^{E_0} \frac{\mu(E_0)\mu(E_1)\dots\mu(E_n)}{\omega\omega_1\dots\omega_n} \times$$

$$\times K\left(\frac{E_0-E_n}{1-\omega_n}\right) K\left(\frac{E_n-E_{n-1}}{\omega_n-\omega_{n-1}}\right) \dots K\left(\frac{E_1-E}{\omega_1-\omega}\right) \times$$

$$\times \left\{ \sum_{m=1}^n \frac{e^{-\frac{\mu(E_m)}{\omega_m}x}}{\left(-\frac{\mu(E_m)}{\omega_m} + \frac{\mu(E)}{\omega}\right)\left(-\frac{\mu(E_m)}{\omega_m} + \mu(E_0)\right)} \right\} \times$$

$$\times \frac{1}{\prod_{j=1}^{m-1} \left(-\frac{\mu(E_m)}{\omega_m} + \frac{\mu(E_j)}{\omega_j}\right) \prod_{j=m+1}^n \left(-\frac{\mu(E_m)}{\omega_m} + \frac{\mu(E_j)}{\omega_j}\right)} +$$

$$+ \frac{e^{-\frac{\mu(E)}{\omega}x}}{\left(-\frac{\mu(E)}{\omega} + \mu(E_0)\right) \prod_{j=1}^n \left(-\frac{\mu(E)}{\omega} + \frac{\mu(E_j)}{\omega_j}\right)} +$$

$$+ \left. \frac{e^{-\frac{\mu(E_0)}{\omega}x}}{\left(-\mu(E_0) + \frac{\mu(E)}{\omega}\right) \prod_{j=1}^n \left(-\mu(E_0) + \frac{\mu(E_j)}{\omega_j}\right)} \right\} dE_n \quad (4)$$

Приведены результаты расчета функции спектрально-углового распределения потоков нейтронов в защите из AlO_2 .

Экспериментальная проверка методов расчета поля нейтронов за защитой ускорителей протонов выполнена в типичной для ускорителей геометрии источник-защита, а именно для случая, когда протоны бомбардируют "толстую" мишень (например, детали ускорителя или вспомогательного оборудования) и образованные в мишени вторичные частицы падают на защитный экран, за которым необходимо определить радиационную обстановку. Пучок протонов с энергией 660 МэВ, выведенный из ускорителя и сформированный системой коллиматоров, падал на цилиндрическую медную мишень (диаметром 12 см и толщиной вдоль пучка 30 см), установленную на расстоянии 86 см от двухметровой бетонной защиты. За защитой измерены интегральные характеристики (эквивалентная доза и плотность потока нейтронов) поля излучения и энергетические спектры нейтронов. Измерения выполнены вблизи поверхности защиты в четырех местах, расположенных так, что угол между импульсом протонов пучка и вектором, направленным из центра мишени в точку установки детектора, составлял 0° , 30° , 39° и 65° .

В местах, в которых выполнены измерения, рассчитывались:

а) эквивалентные дозы (двумя полуэмпирическими методами, разработанными Комочковым и Сычевым - Серовым);

б) плотности потоков нейтронов с энергией более 20 МаВ (методом Монте-Карло по программе Соболевского, с помощью решения (4) кинетического уравнения для плоского мононаправленного источника и по данным Олсмиллера для плоской геометрии);

в) энергетический спектр нейтронов (для одной точки) в диапазоне энергий от 1 эВ до 660 МаВ (методом Монте-Карло по программе Соболевского). Сравнение измеренных и рассчитанных величин позволило оценить точность используемых методов расчета защиты ускорителей. В рассмотренном диапазоне углов и толщин защиты эквивалентные дозы, рассчитанные полуэмпирическими методами, как правило, отличаются от измеренных величин не более, чем в 3 раза; методы решения кинетического уравнения в плоской геометрии с такой же точностью позволяют рассчитывать потоки релятивистских нейтронов; метод Монте-Карло дает возможность вычислять потоки релятивистских нейтронов с точностью не хуже $\pm 50\%$. Спектр, рассчитанный методом Монте-Карло, хорошо описывает форму энергетического распределения нейтронов. Значения потоков разных энергетических групп, рассчитанных этим методом, не отличаются от измеренных более чем в 2 раза.

В приложении делается оценка вклада в показания спектрометра нейтронов импульсов от протонов при измерениях в полях излучения за защитой ускорителей ОИЯИ.

В диссертации сформулированы следующие основные результаты выполненной работы:

1. Методом спектрометрирования энергии нейтронов от импульсного быстрого реактора по времени пролета измерена зависимость от энергии чувствительности детектора ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ в шаровых полиэтиленовых замедлителях с диаметром 5,08 см, 7,62 см, 12,7 см и 25,4 см (2,3,5 и 10 дюймов) в интервале энергий от 10^{-2} эВ до 10^3 эВ.

2. Развита методика восстановления спектров нейтронов широкого диапазона энергий (от 0,01 эВ до 1 ГаВ) с использованием детекторов медленных нейтронов с набором замедлителей и углеродсодержащего активационного детектора.

3. Экспериментально исследовано пространственное распределение выхода нейтронов разных энергетических групп из защиты синхротрона на энергию 680 МаВ.

4. Экспериментально изучены энергетические спектры нейтронов за защитой ускорителей протонов Объединенного института ядерных исследований в типичных для кольцевых ускорителей геометрий "источник-защита". Установлены закономерности формирования энергетических распределений потоков нейтронов за защитой ускорителей протонов на высокие энергии.

5. Впервые измерены дифференциальные энергетические спектры протонов, генерируемых в железной защите синхротрона на энергию 660 МаВ.

6. Исследована адекватность показаний приборов оперативного и индивидуального дозиметрического контроля эквивалентной дозе излучения в полях излучения за защитой ускорителей в зависимости от геометрии "защита-источник" и композиции защиты.

7. Предложен метод расчета функции спектрально-углового распределения нейтронов высокой энергии в полубесконечной защите, основанный на решении уравнения переноса нейтронов для случая плоского мононаправленного источника нейтронов на границе защиты.

8. Выполнена экспериментальная проверка методов расчета поля излучения за защитой ускорителей протонов в одной из типичных геометрий "защита-источник". А именно, для случая, когда на защиту падает излучение образованное в "толстой" медной мишени протонами с энергией 660 МаВ.

9. Экспериментально установлено увеличение вклада низкоэнергетического компонента в потоки нейтронов в защите ускорителей по сравнению с полем нейтронов за защитой.

10. Установлена максимальная неопределенность в полной эквивалентной дозе нейтронов при измерении в неизвестном спектре нейтронов за защитой ускорителей прибором, определяющим величину дозы в ограниченном интервале энергий.

Выполненные исследования позволили сделать следующие основные выводы:

1. Форма энергетических спектров нейтронов $\Phi(E)$ за защитой протонных ускорителей, в основном, зависит от композиции защиты и геометрии "источник-защита". Функция $E \cdot \Phi(E)$ за сплошной за-

щитой имеет максимум в области нейтронов высокой энергии. У наиболее "жестких" спектров максимум расположен вблизи 100 МэВ. Положение этого максимума слабо зависит от энергии ускоренных протонов в исследуемом диапазоне энергий этих частиц и, в основном, определяется геометрией "источник-защита". Проемы в защите приводят к значительному увеличению в спектре нейтронов низких энергий за счет рассеянного излучения, выходящего через эти проемы.

2. Энергетический спектр $\Phi(E)$ протонов, выходящих из четырехметровой ($\sim 3000 \text{ г/см}^2$) железной защиты синхроциклотрона на энергию 680 МэВ – слабоменяющаяся функция в диапазоне энергий протонов от 50 МэВ до ~ 200 МэВ. Малая величина производной $d\Phi/dE$ обусловлена, в основном, двумя конкурирующими эффектами: преимущественным рождением низкоэнергетических протонов в нуклон-ядерных взаимодействиях и уменьшением вероятности вылета из защиты заряженных частиц с уменьшением их энергии.

3. Измерения эквивалентной дозы приборами, широко используемыми в практике дозиметрического контроля в полях излучений ускорителей выполняются с погрешностями, пока еще превышающими величины, рекомендованные МКРЕ.

4. За защитой ускорителей протонов на высокие энергии эквивалентная доза быстрых нейтронов, определенная по показаниям дозиметров с детекторами, регистрирующими нейтроны по протонам отдачи, может значительно (в десятки раз) превышать наиболее вероятную дозу. Это завышение обусловлено большим вкладом в показания дозиметров протонов, выходящих из защиты ускорителя и с высокой эффективностью регистрируемых детектором.

5. Коэффициент перехода от плотности потока релятивистских нуклонов, измеренных по активации углерода (реакция $^{12}\text{C}(x,2x)^{12}\text{C}$), к мощности эквивалентной дозы нейтронов с энергией более 20 МэВ за защитой ускорителей ОИЯИ не превышает $0,21 \frac{\text{мэВ}\cdot\text{см}\cdot\text{сек}}{\text{час}\cdot\text{нейтр}}$.

6. Метод Монте-Карло позволяет вычислять потоки релятивистских нейтронов за защитой ускорителей протонов на энергии менее 1 ГэВ с точностью не хуже $\pm 50\%$. Рассчитанные этим методом энергетические спектры нейтронов правильно описывают форму измеренных спектров.

Методы расчета защиты, основанные на решении кинетического уравнения в плоской геометрии, занижают потоки релятивистских

нейтронов в несколько раз для геометрии "источник-защита", в которой выполнялась экспериментальная проверка методов расчета защиты.

Эквивалентные дозы, рассчитанные полуэмпирическими методами, как правило, отличаются от измеренных величин не более чем в 3 раза.

7. Дальнейшие исследования энергетических распределений нуклонов за защитой ускорителей для целей радиационной защиты следует развивать в следующих направлениях:

- исследование спектрально-угловых распределений протонов за защитой ускорителей заряженных частиц;
- дальнейшая экспериментальная проверка методов расчета дифференциальных характеристик поля излучения за защитой ускорителей заряженных частиц в типичных геометриях "источник-защита";
- совершенствование методов спектрометрии нуклонов широкого диапазона энергий.

Материалы диссертации докладывались автором на следующих конференциях и совещаниях:

1. Международное совещание по дозиметрии и физике защиты на ускорителях (Дубна, 7-10 октября 1969 г.).

2. Международный конгресс по защите от излучений ускорителей и космического пространства (ЦЕРН, Женева, 26-30 апреля 1971 г.).

3. Международный симпозиум по нейтронной дозиметрии для радиологической защиты (Вена, 11-15 декабря 1972 г.).

4. IV Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц (Москва, 18-20 ноября 1974 г.).

5. IV Международный конгресс Международной ассоциации радиационной защиты (Париж, 24-30 апреля 1977 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- В.Е.Алейников, В.П.Афанасьев, М.М.Комочков, В.Н.Лебедев, В.М.Назаров, М.И.Салацкая. ОИЯИ, Б1-2759, Дубна (1966).
- В.Е.Алейников, В.Н.Лебедев. Препринт ОИЯИ, Р9-3393, Дубна (1967).
- В.Е.Алейников, В.А.Архипов, М.М.Комочков. Препринт ОИЯИ, Р16-4480, Дубна (1969).

4. Л.Ветцель, Г.Кнешке, Г.Таут, В.Е.Алейников, В.А.Архипов, М.М.Комочков, В.М.Назаров, Ф.Клаппер. В сб. Дозиметрия излучений и физика защиты ускорителей заряженных частиц, ОИИИ, 16-4888, 201, Дубна (1970).
5. В.Е.Алейников, Л.Р.Кимель, М.М.Комочков, В.П.Сидорин. Атомная энергия, т.28, вып.5, 438 (1970).
6. V.E.Aleinikov, M.M.Komochkov, V.I.Tsvoboon. В сб. International Congress on Protection against Accelerator and Space Radiation, vol.I, p.282, CERN 71-16(1971).
7. В.Е.Алейников, В.П.Гердт, М.М.Комочков. В сб. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, vol.I, p.31, IAEA, Vienna (1973).
8. В.Е.Алейников, В.А.Архипов, В.Ф.Виноградов, М.М.Комочков, Ю.В.Мокров, М.И.Салацкая, А.П.Череватенко. В сб. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, vol.II, p.363, IAEA, Vienna (1973).
9. В.Е.Алейников, М.М.Комочков, В.П.Крючков. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, изд. "Наука", т.П, стр.226 (1975), Препринт ОИИИ Р16-8179, Дубна (1974).
10. В.Е.Алейников, В.П.Крючков. Сообщение ОИИИ, Р16-8177, Дубна (1974).
11. В.Е.Алейников, В.П.Гердт, М.М.Комочков. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, изд. "Наука" т.П, стр.240 (1975). Препринт ОИИИ Р16-8176, Дубна (1974).
12. В.Е.Алейников, В.П.Гердт, Г.Н.Тимошенко. Атомная энергия, т.41, вып.5, стр. 332 (1976). Препринт ОИИИ, Р16-9400, Дубна (1975).
13. В.Е.Алейников, В.П.Бамблевский, Е.П.Череватенко. Сообщение ОИИИ, Р16-9123, Дубна (1975).
14. Alejnikov V.E., Gerdt V.P., Komochkov M.M. В трудах IV-th International Congress IRPA (Paris, 24-30 April 1977), vol.3, p.823 (1977).
15. В.Е.Алейников, В.П.Гердт, М.М.Комочков. Атомная энергия, т.42, вып.4, стр.305 (1977). Препринт ОИИИ, Р16-9870, Дубна (1976).

Рукопись поступила в издательский отдел
12 сентября 1978 года.