

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

X - 335

16 - 12929

ХВОСТОВ
Владимир Борисович

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ
В СТРУКТУРАХ ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
НА ЭНЕРГИЮ 0,1-30 ГэВ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте и Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Виталий Васильевич
Фролов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Владимен Сергеевич
Барашенков

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Борис Сергеевич
Сычев

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

Автореферат разослан " _____ " 1979 г.

Защита диссертации состоится " _____ " 19__ г.
в " _____ " час. на заседании Специализированного совета
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института
ядерных исследований, г.Дубна, Московской области, Лаборатория
высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Ученый секретарь
Специализированного совета *М.Ф.Лихачев* М.Ф.Лихачев

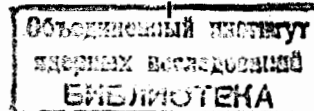
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы прогнозирования радиационных нагрузок на ускорительные структуры определяется развитием ускорительной техники в направлении увеличения энергии и интенсивности ускоренных частиц. Особое значение эта проблема приобретает в связи с разработкой сильноточных ускорителей и перспективой создания ускорителей на сверхпроводящих магнитах.

Основным источником излучения, обуславливающим радиационные нагрузки на элементы ускорительных структур, являются потери частиц на различных этапах работы ускорителя. Проблема снижения потерь является первоочередной при создании современных ускорительных комплексов, однако в настоящее время она еще далеко не решена.

Установление связи между величиной радиационных нагрузок на компоненты ускорителя и потерями частиц является одной из основных задач, без решения которой невозможно установление величины допустимых потерь. В диссертационной работе приводятся результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований характеристик поля излучения в материале ускорительных структур, возникающего при потерях высокоэнергетических протонов.

Основная цель работы состояла в исследовании закономерностей формирования поля излучения в элементах структуры протонных ускорителей на энергию 0,1-30 ГэВ. Для решения поставленной задачи необходимо как привлечение расчетно-теоретических методов переноса излучения в сложной геометрии, так и проведение экспериментальных исследований на пучках частиц высоких энергий. Кроме того, дополнительная цель работы заключалась в применении разработанных методов и расчетных программ для решения актуальных задач



радиационной физики и дозиметрии на существующих и проектируемых ускорителях.

Соответственно решение поставленной задачи заключалось:

- в разработке методики расчета характеристик поля излучения и радиационных нагрузок на материалы ускорительных структур при потерях протонов с энергией 0,1-30 ГэВ;

- в экспериментальной проверке расчетной методики;

- в исследовании влияния пространственного, углового и энергетического распределений источника (потерь протонов) на характеристики поля излучения в ускорительных структурах;

- в применении результатов исследования для решения актуальных задач дозиметрии и радиационной физики на существующих и проектируемых ускорителях.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые проведены систематические исследования характеристик поля излучения в ускорительных структурах и вблизи них при потерях протонов с энергией 0,1-30 ГэВ.

Экспериментально определены пространственные распределения поглощенной дозы и флэнса частиц различных энергетических диапазонов при "скользящей" высадке на ионопровод протонного пучка с энергией 7,5 ГэВ с изученным пространственно-угловым распределением. Исследована роль процесса многократного кулоновского рассеяния протонов на распределение потерь в ускорителях.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученная новая информация может быть использована при определении радиационных нагрузок на магниты в проекте "Нуклотрон", а также при разработке систем регистрации потерь на высокоэнергетических ускорителях средних энергий. Результаты работы использованы при проектировании и сооружении радиационной защиты экспериментальных залов,

при определении величины допустимых радиационных нагрузок на сверхпроводящий образец при облучении его пучком релятивистских дейтронов.

Автор защищает:

1. Разработанную методику расчета характеристик поля излучения в элементах ускорительных структур и вблизи них при потерях протонов с энергией 0,1-30 ГэВ.

2. Результаты экспериментальных исследований характеристик поля излучения в макетном эксперименте на протонном пучке синхрофазотрона ОИЯИ на 10 ГэВ.

3. Результаты расчетно-теоретических исследований влияния пространственного, углового и энергетического распределений источника (потерь протонного пучка) на величину дозовых нагрузок в элементах ускорительных структур.

4. Методику прогнозирования полей излучения вблизи протонных ускорителей на высокие энергии и в экспериментальных залах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на семинарах подсекции "Радиационная защита и работа в условиях высоких уровней ионизирующего излучения" при Совете по проблемам ускорения заряженных частиц АН СССР (Одесса, 1975 г.; Протвино, 1977 г.; Дубна, 1979 г.), на I Всесоюзной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок (Москва, МИФИ, 1974 г.), на IV (Москва, 1974 г.) и V (Дубна, 1976 г.) Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в семи препринтах и сообщениях ОИЯИ, трех статьях в сборнике "Вопросы дозиметрии и защиты от излучений", в четырех тезисах докладов на Всесоюзных совещаниях и конференциях.

Структура и объем диссертации. Текст состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация содержит 199 страниц, включая 20 таблиц и 75 рисунков. Список литературы насчитывает 133 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении отмечается актуальность проблемы исследования и сформулирована основная цель работы: изучение закономерностей формирования поля излучения в структурах протонных ускорителей на энергию 0,1-30 ГэВ. Указано место работы в общей проблеме исследования радиационных полей на высокоэнергетических ускорителях и дано краткое содержание диссертации по главам.

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА КОМПОНЕНТЫ ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

В первой главе, на основании литературных данных, выполнен анализ экспериментальных и расчетных результатов, характеризующих потери протонного пучка как источник излучения, а также приведены сведения о величинах радиационных нагрузок на компоненты действующих ускорителей и расчетных методах их оценок.

Потери частиц на различных этапах работы ускорителя как источник в задаче переноса излучения однозначно характеризуются функцией, названной нами дифференциальной плотностью потерь $S(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$, причем $S(E, \vec{r}, \vec{\Omega}) dE d\Omega ds$ представляет собой число протонов, пересекающих поверхность вакуумной камеры $ds = \rho(\varphi) d\varphi dx$ вблизи точки с координатами $\vec{r} = \{x, y, z = \rho(\varphi)\}$ в направлении $\vec{\Omega}$ в элемент телесного угла $d\Omega$ и имеющих

энергию в интервале $E, E + dE$. По определению функция $S(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$ эквивалентна дифференциальной плотности тока протонов через внутреннюю поверхность вакуумной камеры ускорителя.

Экспериментальное определение функции $S(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$ весьма затруднительно и лишь в ряде частных случаев может быть осуществлено расчетным путем.

На практике обычно используются различные интегральные характеристики функции $S(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$ и связанные с ними функционалы. В ускорительной технике регламентируется величина линейной плотности потерь частиц $L(z)$, определяемая соотношением:

$$L(z) = \int_0^z \rho(\varphi) d\varphi \int_E \int_{\Omega} S(E, \vec{r}, \vec{\Omega}) dE d\Omega.$$

Однако и это распределение в общем случае не может быть рассчитано; на действующих ускорителях оно может быть качественно оценено с использованием распределений, полученных по показаниям детекторов в поле вторичного излучения за стенкой вакуумной камеры ускорителя. Такие распределения мы называем "квазипотерями".

В работе рассмотрены сведения о квазипотерях на различных действующих ускорителях и отмечается, что они весьма неравномерны по периметру ускорителя (координате \vec{z}) и апертуре вакуумной камеры (углу φ). Наименее изучены распределения потерь по апертурному углу φ и углам входа протонов в стенку вакуумной камеры $\vec{\Omega}$. Для распределенных по периметру ускорителя потерь (потери в спокойной области) углы входа протонов в стенку вакуумной камеры не должны существенно превышать максимальные значения угловой составляющей аксептанса канала ускорителя, что составляет единицы миллирадиан на современных жесткофокусирующих ускорителях. Максимальное значение углов высадки протонов, оцененное расчетным путем для слабофокусирующего синхрофазотрона ОИИИ, не превышает ~ 100 мрад.

Геометрия облучаемого объекта (магниты ускорителя) и неравномерность распределений источника приводят к существенной трехмерности рассматриваемой задачи. Поэтому расчетные исследования закономерностей формирования полей излучения в ускорительных структурах при "скользящей" высадке могут быть эффективно выполнены лишь методом Монте-Карло. Обзор существующих расчетных кодов переноса адронов и используемой в них информации о характеристиках взаимодействия адронов с веществом показал, что ряд зарубежных и отечественных программ позволяет удовлетворительно воспроизводить характеристики нуклон-мезонного каскада в веществе вплоть до энергии первичных частиц 300-500 ГэВ. Однако сравнение результатов расчета с экспериментальными данными выполнено лишь для случая относительно простой геометрии (гашение пучка, сброс пучка на мишень и т.д.), и в настоящее время отсутствует экспериментальная информация, позволяющая апробировать программы для случая "скользящей" высадки частиц в сложной геометрии. Рассмотренная в работе экспериментальная информация о радиационных нагрузках на компоненты действующих ускорителей не может быть использована в качестве теста для расчетов, поскольку практически отсутствуют сведения об источниках первичного излучения, при которых она получена.

Таким образом, на основании литературного обзора, сформулированы основные задачи исследования:

- разработать методику расчета характеристик поля излучения в трехмерной геометрии с учетом специфики задачи - высадки протонов с энергиями до 30 ГэВ под малыми углами на ионопровод ускорителя;

- с целью получения тестовой информации для расчетов провести экспериментальные исследования характеристик поля излучения в макетном эксперименте;

- провести детальное сравнение результатов расчета и эксперимента для установления пригодности расчетной методики прогнозирования радиационных нагрузок на компоненты ускорителей;

- исследовать влияние пространственного, углового и энергетического распределений потерь протонного пучка в рассматриваемом энергетическом диапазоне на величину радиационных нагрузок на магниты ускорителей.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Во второй главе описана расчетная методика оценки характеристик поля излучения и проведено сравнение результатов расчета с литературными данными.

Методика реализована в виде комплекса расчетных программ "MAGNET" для ЭВМ БЭСМ-6. Локальная оценка энергетических распределений протонов, нейтронов и заряженных π -мезонов с $E \geq E_{\text{пор}}$. (в расчетах обычно принималось значение $E_{\text{пор}} = 20$ МэВ) в фиксированных точках внутри блока вещества осуществлялась методом Монте-Карло с помощью программы "CASCAD". В процессе вычислений по этой программе мог быть также рассчитан объемный источник нейтронов с $E < E_{\text{пор}}$, перенос которых в дальнейшем мог быть выполнен с помощью программ реакторной физики. В данной работе для этой цели предназначены программы "FASTER" (автор - Жордан, США) и "TRACY" (автор - Кригер, ГДР). Эти программы апробированы нами совместно с системой групповых констант в ряде тестовых расчетов, что позволило сделать вывод о надежности и достоверности полученных с их помощью результатов.

Комплекс программ "MAGNET" позволяет рассчитывать энергетические распределения частиц в блоках вещества сложной конфигурации, а также различные интегральные характеристики, такие, как флюенс частиц, доза и т.д. Сравнение результатов расчета с литературными данными показало хорошее согласие потоковых характеристик, однако было замечено существенное расхождение в величине дозовых нагрузок на материалы типа железо-медь в наших расчетах и работах Ранфта. При этом в расчетах Ранфта весьма заметный вклад в энерговыделение в веществе осуществляется за счет ядерных взаимодействий высокоэнергетических частиц.

Для проверки правильности определения коэффициентов перехода от плотности потока к дозе в материале нами было выполнено измерение энерговыделения в образце из $NbTi$, облучаемого протонами медленного вывода из синхрофазотрона ОИЯИ с энергией 7,5 ГэВ. Измеренное значение коэффициента перехода в пределах экспериментальной погрешности ($\approx 30\%$) согласуется с принятой в наших расчетах величиной и в ~ 3 раза ниже, используемого в работах Ранфта.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

В третьей главе представлены экспериментальные результаты, полученные нами в макетном эксперименте на пучке протонов медленного вывода из синхрофазотрона ОИЯИ с энергией 7,5 ГэВ. Измерены характеристики поля излучения, возникающего при "скользящей" высадке пучка на ионопровод установки и сбросе пучка на внутреннюю мишень.

Для проведения измерений нами была разработана и создана экспериментальная установка, условно названная "Модель". Установка "Модель" представляет собой геометрическую копию дипольного магнита длиной ~ 170 см и наружным диаметром яра 50 см, расположенную на станине с четырьмя встиковочными домкратами. Ионопровод ускорителя моделируется с помощью тонкостенной стальной трубы диаметром 10 см с прикрепленными к ней латунными насадками, имитирующими обмотки магнита. В установке имеются экспериментальные каналы, предназначенные для размещения в них пенылов с детекторами. В качестве детекторов использовались активационные детекторы, фотоэмульсии, термоллюминесцентные дозиметры и наперстковые ионизационные камеры.

С помощью встиковочных домкратов устанавливался угол α между осью установки и осью протонного пучка, причем погрешность вострировки на заданный угол α не превышала ± 2 мрад. Измерения проводились для двух выбранных значений угла α , равных 35 и 100 мрадиан. Значение угла $\alpha = 100$ мрад выбрано как максимально возможное в практике действующих ускорителей, а выбор значения $\alpha = 35$ мрад обусловлен характеристиками протонного пучка, используемого в эксперименте. При $\alpha = 35$ мрад пучок полностью "терялся" в экспериментальной установке, что позволяло использовать полную интенсивность пучка. Кроме того, расходимость пучка слабо сказывалась на угловом распределении имитируемых потерь протонного пучка.

Для однозначного определения функции дифференциальной плотности потерь пучка в эксперименте необходимо знание пространственно-углового распределения протонов в пучке. Нами была разработана методика определения пространственно-угловых распределений протонов в пучках, имеющих достаточно большие эмиттансы (боль-

ше ~ 100 мм.мрад) и пространственные распределения, близкие к нормальным. В результате измерений определены параметры, необходимые для описания пространственно-углового распределения протонов в пучке медленного вывода. Полученное распределение использовано в дальнейшем для моделирования функции дифференциальной плотности потерь в эксперименте методом Монте-Карло.

Измерение флюенса адронов с энергией $E > 130$ МэВ выполнено с помощью ядерных фотоэмульсий типа БР-2. Активационные детекторы на основе углерода $^{12}\text{C}(x, xn)^{12}\text{C}$ и серы $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ использованы для измерения флюенса адронов с $E > 20$ МэВ и флюенса нейтронов в диапазоне $3 < E < 25$ МэВ, соответственно. Поглощенная доза измерялась с помощью термолуминесцентных дозиметров на основе LiF и наперстковых ионизационных камер со стенками из латуни. Калибровка детекторов проводилась на пучках синхротронного и синхрофазотрона ОИЯИ, изотопных источниках и в исследовательском реакторе МИФИ. Мониторинг интенсивности пучка осуществлялся с помощью плоскопараллельной ионизационной камеры, наполненной гелием, и контролировалось с помощью пикап-электрода.

Аналогичные измерения выполнены при наличии в ионопроводе установки "Модель" тонкой внутренней мишени из меди, полностью перекрывающей апертуру ионопровода.

Результаты измерений сравниваются с расчетными распределениями, полученными по программе "MAGNET" методом Монте-Карло. Наблюдается удовлетворительное согласие результатов расчета и эксперимента, причем вблизи максимумов распределений расхождение не превышает $\sim 30\%$. В среднем расчет позволяет воспроизводить характеристики поля излучения с погрешностью, не превышающей фактор 2.

Это позволяет использовать расчетную методику для исследо-

вания закономерностей формирования поля излучения при распределенных потерях протонного пучка.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ПРИ ПОТЕРЯХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ

В четвертой главе, с помощью расчетной методики, апробированной в макетном эксперименте, изучаются закономерности формирования поля излучения в ускорительных структурах и вблизи них при "скользящей" высадке протонного пучка. Исследовано влияние на характеристики поля излучения пространственного, углового и энергетического распределений источника. Показано, что при потерях протонов с энергией $E_0 = 1-30$ ГэВ радиационные нагрузки на обмотки магнитов в основном обусловлены адронной компонентой с энергией $E > 20$ МэВ, причем суммарный вклад в энерговыделение от заряженных частиц с $E < 20$ МэВ не превышает $\sim 30\%$.

Исследование закономерностей отражения протонов от стенок вакуумной камеры обратно в нее за счет процесса многократного кулоновского рассеяния в материале показало, что значительная часть частиц может избежать процесса ядерного взаимодействия в материале вблизи места высадки на ионопровод. Такие частицы должны испытать повторную высадку на ионопровод из-за несоответствия их энергии режиму устойчивого движения или ускорения, а также из-за выхода их фазового объема за аксептанс канала ускорителя или системы транспортировки.

Количество отраженных протонов существенно зависит от углового и энергетического распределений потерь пучка и может достигать $\sim 50-80\%$ при углах высадки $\alpha \sim 1$ мрад и энергиях первичных прото-

нов 0,1–1 ГэВ. Очевидно, что рассмотренный процесс приводит к перераспределению потерь в ускорителе и затрудняет диагностику причин, приводящих к потерям протонного пучка.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И ДОЗИМЕТРИИ НА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ

В пятой главе приведены результаты решения ряда актуальных задач радиационной физики и дозиметрии на высокоэнергетических ускорителях, полученные с помощью методов и расчетных программ, разработанных в процессе исследований.

Результаты расчета дозовых распределений в элементах ускорительных структур использованы для оценки величины дозовых нагрузок на обмотки магнитов ускорителей. Предполагается, что потери протонов с энергией 1–30 ГэВ происходят равномерно на длине магнита. Установлено, что величина поглощенной дозы вблизи поверхности вакуумной камеры ускорителя линейно растет с увеличением энергии протонов. Результаты расчета нашли применение при оценке допустимых радиационных нагрузок на магниты и потерь частиц в проекте ускорителя "Нуклотрон".

Наряду с решением прямой задачи, описанной выше, предпринята попытка решения обратной задачи – восстановление распределения потерь протонного пучка по известному (измеряемому) распределению вторичного излучения вблизи ускорителя. Описана методика восстановления линейной плотности потерь протонов, состоящая в решении системы интегральных уравнений типа свертки. Исследованы и приведены в работе характеристики ядра интегрального уравнения, рассчитанные с помощью разработанных нами методик, для диапазона энер-

гий первичных протонов ~ 50–300 МэВ. Выполненные расчеты позволяют оценить требуемую чувствительность датчиков регистрирующей аппаратуры при заданном уровне допустимых потерь. Результаты исследований использованы при разработке системы регистрации потерь пучка в строящемся ускорителе ИЯИ "Мезонная фабрика".

Методика расчета энерговыделения в малых объемах вещества применена нами для оценки допустимой величины критического тока (минимальной подкритичности) в сверхпроводящем образце из NbTi, находящегося в магнитном поле 5Т, при облучении его в пучке релятивистских дейтронов с энергией ~ 5 ГэВ/нуклон.

Результаты измерений и расчетов показали, что величина допустимого радиационного разогрева практически совпадает с величиной допустимого разогрева Джоулевым теплом.

Программы переноса адронов методом Монте-Карло применены для физического обоснования развитой нами методики расчета полей излучения вокруг ускорителей и в экспериментальных залах. Суть методики состоит в систематизации геометрии источник–защита. Выполненные расчеты позволили обосновать предположение, что для расчета радиационной защиты ускорителя и полей излучения вокруг него достаточно сведений о распределении "квазипотерь" или линейной плотности потерь пучка. Метод расчета полей излучения вокруг ускорителя и в экспериментальных залах апробирован в серии измерений на синхрофазотроне ОИЯИ на 10 ГэВ при создании системы медленного вывода пучка из ускорителя. Измерения поля излучения вокруг ускорителя после создания комплекса радиационной защиты системы медленного вывода подтвердили результаты прогноза в пределах фактора 2.

ВЫВОДЫ

Исследования, выполненные в настоящей диссертационной работе, позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Анализ литературных данных о характеристиках полей излучения, методах их расчета и измерений показал отсутствие надежной исходной информации о первичном источнике излучения (потерях протонного пучка) и расчетных кодов переноса излучения, апробированных в сложной геометрии. На основании этого сформулирована задача исследования, конечным результатом которого является получение информации, необходимой для корректного определения величин допустимых потерь протонного пучка.

2. Разработан и апробирован комплекс вычислительных программ "MAGNET", предназначенный для определения характеристик поля излучения в сложной геометрии при энергии первичных частиц в диапазоне 0,1-30 ГэВ.

3. Рассмотрено влияние процесса многократного кулоновского рассеяния протонов в материале стенки вакуумной камеры на перераспределение потерь пучка в ускорителях. Исследована зависимость числа отраженных протонов от энергии и угла входа первичных протонов в стенку вакуумной камеры.

4. Разработана и создана экспериментальная установка для измерения полей излучения, возникающих при потерях высокоэнергетических частиц. Выполнен макетный эксперимент на пучке протонов медленного вывода из синхрофазотрона ОИИИ с энергией 7,5 ГэВ по определению пространственно-энергетических и дозовых распределений излучения, при "скользящей" высадке пучка на ионопровод установки и сбросе его на внутреннюю мишень.

5. Разработана методика и определены параметры простран-

венно-углового распределения протонов в пучке, что позволило получить полную информацию об источнике первичного излучения в эксперименте. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Это позволило сделать вывод о пригодности созданного комплекса расчетных программ для выполнения детальных исследований характеристик поля излучения в ускорительных структурах.

6. Разработана и экспериментально проверена методика расчета энерговыделения в образцах с малыми геометрическими размерами, облучаемых в пучках релятивистских частиц. Выполнены измерения величины допустимых радиационных нагрузок на сверхпроводящий образец из NbTi, находящийся в магнитном поле 5Т, при облучении его в пучке релятивистских дейтронов с энергией ~ 5 ГэВ/нуклон. Определен вклад ядерных взаимодействий в величину энерговыделения в образце.

7. На основании расчетно-теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

а) угловое распределение потерь протонов сильно влияет на величину дозовых нагрузок в ускорительных структурах. Это влияние обусловлено при малых углах высадки протонов α зависимостью коэффициента отражения протонов от вакуумной камеры ускорителя за счет процесса многократного кулоновского рассеяния. При достаточно больших углах α , сравнимых со средними углами вылета ливневых частиц в ядерных взаимодействиях, направленностью межъядерного каскада в веществе;

б) величина дозовых нагрузок на элементы ускорительных структур вблизи поверхности вакуумной камеры существенно зависит от распределения потерь по апертуре вакуумной камеры. Отсутствие

информации о распределении потерь по апертурному углу φ приводит к неопределенности в определении максимальной величины радиационных нагрузок на элементы в пределах фактора 3-5 при стандартных размерах апертуры ионопровода. На значительном удалении по радиусу от оси ускорителя поле излучения практически не зависит от вида распределения потерь по углу φ ;

в) величина дозовых нагрузок на элементы ускорительных структур вблизи вакуумной камеры ускорителя линейно растет с увеличением энергии протонов E_0 . В диапазоне энергий первичных протонов $1 < E_0 < 30$ ГэВ поглощенная доза на $\sim 70\%$ определяется ионизационными потерями адронов с $E > 20$ МэВ. Нуклонная компонента играет определяющую роль в формировании дозного поля;

г) разработанные методы и результаты исследований использованы при проектировании и сооружении радиационной защиты экспериментальных залов синхрофазотрона ОИЯИ на 10 ГэВ, в связи с созданием системы медленного вывода пучка и увеличением его интенсивности; при определении радиационных нагрузок на магниты в проекте "Нуклотрон"; при разработке системы регистрации потерь пучка для строящегося ускорителя "Мезонная фабрика"; при определении энерговыделения в сверхпроводящем образце из $NbTi$; облучаемого дейтонами с энергией 5 ГэВ/нуклон в совместном криогенном эксперименте ЛВЭ ОИЯИ и МИФИ.

Дальнейшие исследования закономерностей формирования поля излучения в ускорительных структурах целесообразно направить на изучение характеристик поля излучения при потерях релятивистских тяжелых ионов и изучить влияние магнитного поля на распределение вторичных частиц.

МАТЕРИАЛЫ, В КОТОРЫХ ОТРАЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

1. Л.Р.Кимель, Я.Н.Расцветалов, В.П. Сидорин, В.Б.Хвостов. Расчет методом Монте-Карло спектральных распределений рассеянного нейтронного излучения от высокоэнергетических ускорителей. Сообщение ОИЯИ Р16-6182, Дубна, 1972.
2. Л.Н.Зайцев, Я.Н.Расцветалов, В.П.Сидорин, В.Б.Хвостов. Метод расчета поля излучения вокруг ускорителей частиц высоких энергий. Сообщение ОИЯИ Р16-6185, Дубна, 1972.
3. Л.Н.Зайцев, И.Б.Иссинский, В.В.Фролов, В.Б.Хвостов. Измерение потерь протонов на синхрофазотроне при нарушении режима работы системы медленного вывода. Сообщение ОИЯИ 9-7930, Дубна, 1974.
4. А.И.Антипов, В.Б.Гетманов, Н.И.Бушуев, Л.Н.Зайцев, И.Б.Иссинский, А.Д.Кириллов, В.В.Мальков, В.П.Сидорин, В.В.Фролов, В.Б.Хвостов. Радиационная защита и поля излучений вокруг синхрофазотрона при медленном выводе протонов. Препринт ОИЯИ Р16-7958, Дубна, 1977; Аннотации докладов, представленных на четвертое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Москва, 18-20 ноября 1974 г.", М., ЦНИАтоминформ, 1974, с. 95.
5. Л.Н.Зайцев, В.Б.Хвостов. Анализ расчета защиты ускорителей высоких энергий по модели Мойера. "Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, 17-19 декабря 1974 г.", М., МИФИ, 1974, с. 92; в кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 16, 1977, М., Атомиздат, с. 9 - 13.

6. А.И.Антипук, В.А.Григорьев, Л.Н.Зайцев, В.В.Мальков, В.Б.Хвостов. Поля излучений внутри экспериментальных залов ускорителей частиц высоких энергий. "Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, 17-19 декабря 1974 г.", М., МИФИ, 1974, с. 81; в кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 16, 1977, М., Атомиздат, с. 64 - 69.
7. Л.Н.Зайцев, В.Б.Хвостов. О характеристиках источников излучения на ускорителях высоких энергий. В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений, вып. 14, 1975, М., Атомиздат, с. 53-56.
8. Л.Н.Зайцев, Е.Д.Клещенко, Н.И.Рублев, Ю.В.Семенов, В.П.Сидорин, В.В.Фролов, В.Б.Хвостов. Исследование пространственно-энергетического распределения излучения в элементах структуры высокоэнергетических ускорителей. "Аннотации докладов, представленных на пятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 5-7 октября 1976"; М., ЦНИАтоминформ, 1976, с. 25.
9. В.И.Волков, Л.Н.Зайцев, В.П.Зорин, Е.Д.Клещенко, С.А.Новиков, Н.И.Рублев, Ю.В.Семенов, В.П.Сидорин, В.В.Фролов, В.Б.Хвостов. Исследование пространственно-энергетического распределения излучения в элементах структуры высокоэнергетических ускорителей (макетный эксперимент). Часть I. Экспериментальная установка и характеристики пучка протонов. Сообщение ОИЯИ, 16-10812, Дубна, 1977.
10. Л.Н.Зайцев, В.П.Зорин, С.А.Новиков, В.П.Сидорин, В.В.Фролов, В.Б.Хвостов. Исследование пространственно-энергетического распределения излучения в элементах структуры высокоэнергетических ускорителей (макетный эксперимент). Часть 2. Характерис-

тики поля излучения при взаимодействии протонов с тонкой мишенью. Сообщение ОИЯИ 16-12264, Дубна, 1979.

11. Л.Н.Зайцев, В.П.Зорин, Е.Д.Клещенко, С.А.Новиков, В.П.Сидорин, В.А.Фролов, В.Б.Хвостов. Исследование пространственно-энергетического распределения излучения в элементах структуры высокоэнергетических ускорителей (макетный эксперимент). Часть 3. Измерение характеристик поля излучения с помощью активационных детекторов и фотоэмulsionий. Сообщение ОИЯИ 16-12265, Дубна, 1979.
12. Л.Н.Зайцев, В.П.Зорин, С.А.Новиков, Ю.В.Семенов, В.П.Сидорин, В.В.Фролов, В.Б.Хвостов. Исследование пространственно-энергетического распределения излучения в элементах структуры высокоэнергетических ускорителей (макетный эксперимент). Часть 4. Измерение дозовых распределений с помощью ионизационных камер и термоллюминесцентных дозиметров. Сообщение ОИЯИ 16-12266, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 ноября 1979 года.