

C-952

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.12.043:538.172.17

16-89-429

СЫРЕЙЩИКОВ
Андрей Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖЪЯДЕРНОГО КАСКАДА
В ВЕЩЕСТВЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
ПРИ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ
ДО 10 ГэВ на нуклон**

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1989

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор ЗАЙЦЕВ Л.Н.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор БАРАШЕНКОВ В.С.

кандидат физико-математических
наук СЕРЕЖНИКОВ С.В.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, г. Москва

Защита диссертации состоится "___" _____ 198 г.
в ___ час. ___ мин. на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, Дубна Московской области, конференц-зал ЛМП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 198 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета

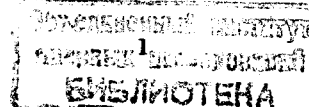
Ю.А.БАТУСОВ

Актуальность темы. Теоретически предсказываемая возможность достижения в центральных соударениях достаточно тяжелых ядер термодинамических условий перехода ядерной материи в фазу кварк-глюонной плазмы уже при энергиях до 10 ГэВ на нуклон стимулировала за последние десять лет во всем мире интерес к экспериментальным исследованиям ядро-ядерных взаимодействий. Это, в свою очередь, инициировало создание новых проектов ускорителей тяжелых заряженных частиц на высокие энергии и интенсивности. Практическое использование пучков ядер в качестве источников адронов в современной медицине и биологии, для получения в больших количествах новых изотопов в ядерной энергетике предъявляет дополнительные требования к этим проектам, связанные с достижением максимально возможных интенсивностей ядер в пучке, с возможностью широкого варьирования их масс и энергий.

Большинство разрабатываемых в настоящее время проектов ориентировано на значительно менее энерго- и материалоемкие варианты ускорителей со сверхпроводящими магнитными структурами. Однако, как показывает практика использования этих структур при ускорении протонов на сверхвысокие энергии (США), малый температурный запас используемых сверхпроводников $\Delta T \sim 0,5$ К на переход обмоток в нормальное состояние приводит к тому, что фактор радиационного разогрева из-за неизбежных потерь при инжекции, ускорении и выводе частиц пучка становится основным, ограничивающим проектными интенсивности и энергии.

Единственным способом оценки радиационных нагрузок на сверхпроводящие обмотки (СПО) на стадии проектирования является метод прямого статистического моделирования физических процессов, связанных: - с транспортировкой частиц в магнитных и электростатических полях; - с формированием потерь на внутренних мишенях (септумах); - с развитием ядерно-электромагнитного каскада вторичных частиц, инициированного потерями ядер пучка в сложных по конфигурации и ядерно-физическому составу материалов мишенях - магнитных элементах ускорителя.

В настоящее время этот метод достаточно развит и реализован в виде комплексов Монте-Карловских программ (MARS и др.) лишь для протонных ускорителей на высокие и сверхвысокие энергии. В случае моделирования межъядерного каскада частиц, инициированного ядрами, существующие методики позволяют рассчитывать либо поля вторичного излучения в легких средах в одномерной геометрии мишеней вплоть до толщин ~ 30 г/см² (ядра с массой 1+56 а.е.м. с энергией до 20 ГэВ на нуклон) от космического галактического излучения, либо в трехмер-



ной геометрии протяженной мишени при гашении пучка легких (до углерода) ядер с энергией до 10 ГэВ в конденсированных, в том числе и делящихся, средах и в атмосфере (КАСКАД).

Для того чтобы надежно прогнозировать радиационные нагрузки на сверхпроводящих ускорителях ядер нового поколения (проект "Нуклотрон" ЛВЗ ОИЯИ), когда планируемые энергии ядер составляют $\sim 0,1+6$ ГэВ на нуклон, а их массы могут меняться от 1 до 240 а.е.м., необходимо дополнить имеющиеся подходы по следующим основным направлениям:

- включить в моделирование межъядерного каскада частиц особенности электромагнитного и ядерного взаимодействий средних и тяжелых ядер с атомами мишени;
- включить в описание траекторий заряженных, в том числе и многозарядных, частиц искривление за счет магнитного поля;
- включить процессы альбедного типа для многозарядных частиц на границе "среда-вакуум" при малых углах высадки первичных ядер и наличии поля в типичных геометриях магнитных структур ускорителя.

Предметом исследования являются процессы взаимодействия высокоэнергетических частиц и ядер с атомами конденсированных сред в диапазоне кинетических энергий $0,1+10$ ГэВ на нуклон (адрон); методы моделирования ядерно-электромагнитного каскада в сложных трехмерных геометриях мишени; методы расчета пространственного распределения поглощенной дозы; методы моделирования траекторий частиц пучка и потерь в магнитах и линзах систем медленного вывода и суперпериода ускорителя ядер.

Цель работы заключается в разработке методики и создании на ее основе комплекса программ расчета дозовых характеристик полей высокоэнергетического излучения, инициируемых взаимодействием тяжелых релятивистских ядер с веществом в трехмерной геометрии с магнитным полем.

Методы исследований. В диссертационной работе использовался математический аппарат теории статистического моделирования сильноветвящихся процессов, теории многократных столкновений и теории переноса высокоэнергетического излучения в веществе, а также элементы теории моделирования физических процессов на ЭВМ и статистической обработки результатов.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- проанализированы особенности переноса средних и тяжелых ядер в конденсированных средах, в частности, учтен процесс электродиссоциации релятивистских ядер;
- исследована роль фрагментов ядер в развитии межъядерного каскада частиц и в формировании пространственного распределения поглощенной дозы в веществе;

- получены расчетные данные о влиянии магнитного поля на дифференциальные характеристики альбеда (отражение) многозарядных частиц и на глубинное распределение дозы при высадке ядер на поверхность мишени под малыми ($\alpha_{\epsilon} = 1+100$ мрад) углами;
- создана программа расчета радиационных тепловыделений в магнитных структурах ускорителей ядер и сделан прогноз допустимых интенсивностей при медленном выводе из ускорителя пучка ядер с массой от 1 до 207 а.е.м. в диапазоне энергий $0,2+6$ ГэВ на нуклон.

Автор защищает:

- 1) методику расчета пространственного распределения поглощенной дозы при развитии ядерно-электромагнитного каскада частиц, инициированного ядрами, в веществе с магнитным полем;
- 2) созданный на основе этой методики комплекс программ (EDMONT) статистического моделирования межъядерного каскада частиц и ядер;
- 3) результаты численных исследований физических закономерностей формирования дозовых характеристик поля вторичного излучения в конденсированной среде со средним зарядом;
- 4) данные о влиянии магнитного поля на альbedo многозарядных высокоэнергетических частиц и на пространственное распределение дозы в мишени при высадке на ее поверхность под малыми углами релятивистских ядер;
- 5) результаты расчетов радиационных тепловыделений в магнитных структурах сверхпроводящих ускорителей ядер.

Практическая значимость состоит в том, что разработанный автором комплекс программ EDMONT позволяет прогнозировать радиационные нагрузки в реальных геометриях и условиях эксплуатации магнитных элементов ускорителей ядер на энергии $0,1+10$ ГэВ на нуклон. Результаты расчетных исследований, проведенных в диссертационной работе, непосредственно используются при создании сверхпроводящих ускорителей релятивистских ядер СПИИ и Нуклотрон в ОИЯИ (г.Дубна).

Результаты исследований могут также использоваться при прогнозировании радиационных нагрузок от многозарядного ионизирующего космического излучения на различные элементы космической техники.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на X Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1986 г.), на Всесоюзных семинарах комиссии научного совета по проблемам ускорения заряженных частиц при ОЯФ АН СССР (1984-1986 гг.), на научной конференции ОЯФ АН СССР "Частицы и ядра при высоких энергиях" (Москва, 1987 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, а также содержит библиографический список из 146 наименований. Объем работы составляет 146 страниц, в ней содержится 33 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, представлен анализ состояния проблемы, а также сформулирована постановка задачи и цель исследований.

В первой главе дан количественный анализ процессов взаимодействия частиц ядерно-электромагнитного каскада с атомами и ядрами атомов конденсированного вещества. Особое внимание уделено специфике переноса высокоэнергетических тяжелых многозарядных частиц (электромагнитные взаимодействия), а также описанию процессов множественного рождения частиц в ядро-ядерных взаимодействиях.

К основным процессам, определяющим перенос многозарядных частиц в веществе в исследуемом диапазоне энергий следует отнести ионизацию и возбуждение атомов среды с испусканием из трека δ -электронов; флуктуации энергетических потерь (страгглинг) и эффективный заряд в конце пробега, которые вместе с многократным кулоновским рассеянием могут быть описаны в рамках теории многократных столкновений. В области энергий ~ 1 ГэВ на нуклон тяжелые многозарядные частицы эффективно взаимодействуют с ядрами среды, причем в неупругих ядро-ядерных взаимодействиях формируется новый по сравнению с адронным каскадом высокоэнергетический компонент поля вторичного излучения - межъядерный каскад многозарядных частиц (фрагментов ядер-снарядов). Кроме того, на медленных стадиях распада наиболее массивных фрагментов (спектаторных остатков) ядер-снарядов генерируются дополнительные источники других высокоэнергетических компонентов: испарение частиц - нуклон-мезонный межъядерный каскад; снятие остаточного возбуждения фотоном - электрон-фотонный ливень. В области релятивистских энергий в средах со средним зарядом сечение электродиссоциации тяжелого ядра становится сравнимым с сечением ядерного взаимодействия, то есть адроны и фотоны, образованные при электромагнитной диссоциации ядер-снарядов, также генерируют соответствующие высокоэнергетические компоненты поля излучения.

Для описания процесса электродиссоциации высокоэнергетических ядер предложены аналитические выражения, полученные исходя из формул Вильямса-Вейцзеккера с использованием экспериментальных данных. Приведены результаты расчетов сечения выхода нуклонов и легких фрагментов по методу Вильямса-Вейцзеккера, по предложенной формуле

в сравнении с экспериментальными измерениями и продемонстрирована работоспособность предложенного полумпирического описания процесса электродиссоциации тяжелых ядер.

На основе анализа литературных данных показано, что в неупругих ядро-ядерных взаимодействиях при релятивистских энергиях из-за ассоциативного характера рождения странных частиц выход пионов почти на два порядка выше, чем выход каонов или гиперонов. То есть, с точностью до вероятности генерации высокоэнергетическим фотоном адронов в фотоядерных реакциях, которой при моделировании электрон-фотонных ливней до энергий в несколько десятков ГэВ пренебрегают, в межъядерном каскаде вторичных частиц можно ограничиться рассмотрением только пионов и их распадов, причем как и в случае адрон-ядерного взаимодействия основным источником электрон-фотонного ливня останутся распады π^0 -мезонов.

Единое теоретическое описание множественного рождения адронов и фрагментов в ядро-ядерных взаимодействиях в настоящее время отсутствует. Гидродинамические и термодинамические модели неплохо описывают распад сильновозбужденной зоны ядерной материи в области перекрытия сталкивающихся ядер в соударениях центрального типа, при этом модели фэйрбол, фэйрстрик не применимы к периферическим взаимодействиям. Модели внутриядерных каскадов воспроизводят лишь начальную стадию столкновения, когда ядерная материя существенно неравновесна. Модели, основанные на уравнении Власова-Улинга-Уленбека, сочетающего в себе и двухчастичные столкновения, и эффекты среднего поля, способны воспроизвести все наблюдавшиеся в экспериментах особенности генерации адронов. Однако, чтобы описать выход многозарядных фрагментов в рамках всех перечисленных выше моделей, требуется введение дополнительных механизмов, ответственных за медленный распад слабовозбужденных спектаторных остатков ядер - испарения, деления, мультифрагментации.

Комплексное сравнение каскадно-испарительной модели $/1/$ с фотоэмульсионными данными по дифференциальным выходам вторичных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях $P+Em$, $d+Em$, $C+Em$, $Ne+Em$ при релятивистских энергиях показало, что она удовлетворительно описывает всю совокупность инклюзивных по прицельному параметру распределений.

При моделировании ядерно-электромагнитного каскада адронов и ядер в веществе, когда статистически реализуется большое число ядерных взаимодействий, интегральные функционалы поля вторичного излучения будут зависеть только от особенностей инклюзивных дифференциальных характеристик множественного рождения частиц. Следовательно, использование каскадно-испарительной модели в качестве генератора

вторичных частиц позволит обеспечить в среднем достоверные величины дозы в исследуемом диапазоне масс и энергий ядер.

Во второй главе на основе анализа приближенных аналитических, численных и статистических методов описания различных компонентов ядерно-электромагнитного каскада предложена методика расчета поглощенной дозы от межъядерного каскада вторичных частиц, инициированного высокоэнергетическими ядрами в диапазоне масс $I+207$ а.е.м. и энергий $0, I+10$ ГэВ на нуклон в мишенях сложных геометрических конфигураций с включением вакуумных зон при наличии внешних магнитных полей.

Методика реализована в комплексе программ EDMONT, в котором ядерные взаимодействия адронов и многозарядных частиц моделируются эксклюзивным способом с помощью каскадно-испарительной модели /1/; распады пионов и электродиссоциация ядер - инклюзивно, с помощью приведенных в первой главе соотношений. Построение траекторий заряженных частиц в веществе и в вакууме осуществляется шаговым методом с учетом искривления за счет магнитного поля и многократного кулоновского рассеяния, а также с учетом флуктуаций передачи энергии на ионизацию и возбуждение атомов вещества. В зависимости от длины траектории (шага) автоматически происходит выбор соответствующего приближенного описания этих процессов в теории многократных столкновений. Для корректного воспроизведения альбедного высокоэнергетического компонента поля излучения вблизи границы "среда-вакуум" введена дополнительно зависимость выбора приближенного описания пространственно-углового распределения заряженных частиц от величины угла между текущим направлением движения и поверхностью границы.

В процессе моделирования межъядерного каскада рассматриваются: межъядерный каскад многозарядных фрагментов, нуклон-мезонный каскад, электрон-фотонный ливень, низкоэнергетический компонент с энергией ниже $0,02$ ГэВ на адрон (нуклон) в приближении "локального поглощения".

Результаты расчетов пространственного распределения дозы сравнены с измерениями, проведенными на пучке синхротрона ЛВЭ ОИЯИ с помощью криогенных калориметрических дозиметров и с расчетами по апробированным комплексам программ MAGNET /2/ и КАСКАД /3/. Показано (рис.1), что предложенная расчетная методика неплохо воспроизводит экспериментальные данные в типичных по геометрии и ядерно-физическому составу материалов магнитных структурах и может использоваться для прикладных расчетов радиационного разогрева сверхпроводящих обмоток на ускорителях релятивистских заряженных частиц.

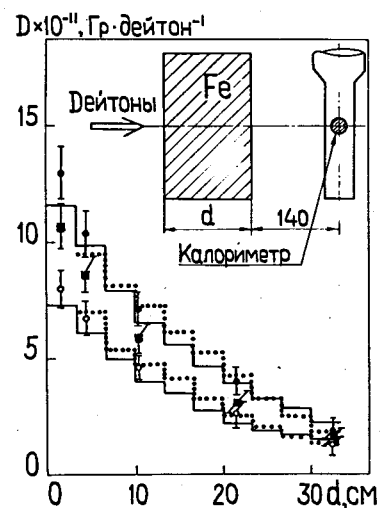


Рис.1. Зависимость дозы D , поглощенной в калориметре, от толщины железного барьера d при гашении пучка дейтонов с энергией $3,655$ ГэВ на нуклон. Гистограммы - расчеты по программам КАСКАД (---) и EDMONT (—); • - измерения датчиком ТВО; ■ - резистор Аллен-Бредли; ○ - медно-никелевый дозиметр.

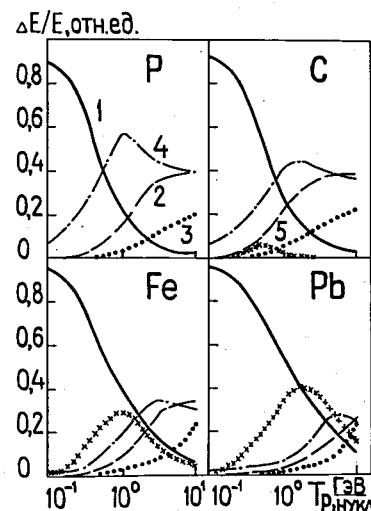


Рис.2. Относительные вклады $\Delta E/E$ в энергию E , поглощенную в железном блоке в зависимости от энергии инициирующего ядра T_p . 1 - инициирующее ядро; 2 - нуклон-мезонный каскад ($T_{пор} = 0,02$ ГэВ на нуклон или адрон); 3 - электрон-фотонный ливень; 4 - низкоэнергетические частицы; 5 - межъядерный каскад многозарядных частиц.

Третья глава посвящена анализу результатов расчетных исследований основных закономерностей формирования дозы от межъядерного каскада частиц, инициированного ядрами, в типичных геометриях гашения и при высадке под малыми (до 100 мрад) углами пучков ядер от протона до свинца на однородные мишени.

В геометрии гашения пучка в полубесконечный железный блок в промежуточной области рассматриваемого диапазона кинетических энергий вклад в полную поглощенную в этом блоке энергию от межъядерного каскада фрагментов становится сравнимым (инициирующие ядра средних масс) или превышает (тяжелые ядра) вклады от остальных высокоэнергетических и низкоэнергетических компонентов поля излучения, достигая в максимуме для ядер свинца ~40% от суммарной величины (рис.2).

Продольное распределение дозы в центральной области развития ядерно-электромагнитного каскада очень чувствительно к энергии и массе инициирующего ядра. Максимальные значения для легких ядер наблюдаются примерно на тех же глубинах, что и у протона, и связаны с множественным рождением адронов в первых актах неупругого ядерного взаимодействия. В случае тяжелых ядер максимум дозы смещен к основанию межъядерного каскада и обусловлен ионизационными потерями первичной частицы и многозарядных фрагментов (рис.3).

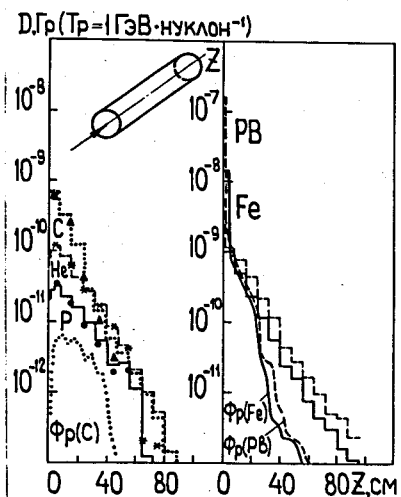


Рис.3. Продольное распределение дозы при гашении тонкого пучка ядер в железный цилиндр радиуса 2 см. Точки - расчет по программе KASKAD: • - протон, * - ядро гелия, ▲ - углерод. Гистограммы - расчет по программе EDMONT; кривые - вклад в дозу от межъядерного каскада многозарядных фрагментов.

При высадке пучка ядер на железную пластину под малыми углами наблюдается сильная зависимость глубинного распределения дозы от типа ядра и угла высадки. Благодаря чувствительности процессов от-

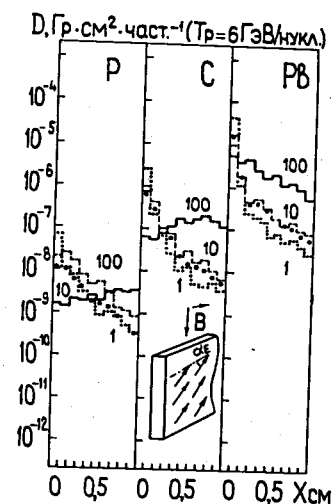


Рис.4. Глубинное распределение дозы в пластине из железа при высадке на ее поверхность под малыми углами широкого пучка ядер. Гистограммы - расчет по программе EDMONT; цифры - величины углов высадки в миллирадианах; точки - распределение дозы при включении магнитного поля $|B(r)| = 4 \text{ Тл}$ (угол высадки 10 мрад).

ражения первичных ядер к наличию внешнего поля наблюдается некоторое изменение этих распределений при включении магнитного поля в мишени характерной для магнитов современных ускорителей величины (рис.4).

В заключительном параграфе главы с помощью программы EDMONT смоделирована радиационная ситуация, возникающая в одном из вариантов Нуклотрона, при медленном выводе пучка частиц и рассчитаны величины радиационных тепловыделений в сверхпроводящих обмотках магнитов и линз системы медленного вывода и суперпериода (рис.5). Определен наиболее "опасный" с точки зрения перехода обмотки в нормальное состояние элемент и оценены предельные интенсивности различных ядер в выводимом пучке.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

I. С целью прогнозирования радиационных нагрузок на сверхпроводящие элементы ускорителей релятивистских ядер в настоящей работе проведен анализ физических процессов, ответственных за перенос в веществе высокоэнергетических ядер, а также особенностей развития ядерно-электромагнитного каскада частиц в магнитном поле при ядерно-ядерных взаимодействиях в диапазоне энергий 0,1-10 ГэВ на нуклон и масс 1-207 а.е.м.

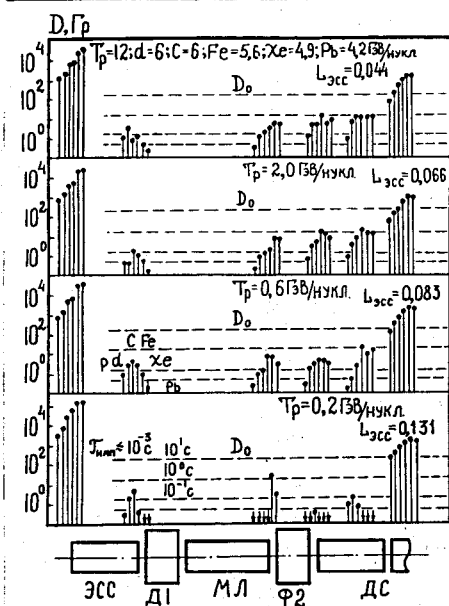


Рис.5. Максимальные значения дозы в обмотках магнитных элементов в одном из вариантов проекта "Нуклотрон" при медленном выводе пучков ядер. ЭСС - система электростатического септума, Д1 - дефокусирующая квадрупольная линза, МЛ - магнит Ламбертсона, Ф2 - фокусирующая линза, ДС - диполь суперпериода; D_0 - значения допустимой на переход в нормальное состояние сверхпроводящих дозы для различных длительностей вывода $T_{имп}$ (пунктирные линии); T_p - энергия выводимых частиц, $L_{эсс}$ - планируемые потери ядер на септуме от проектных значений интенсивности в выводимом пучке.

2. На основе этого анализа разработана методика расчета поглощенной дозы в сложных по составу и конфигурации мишенях с вакуумными включениями. Методика реализована в виде комплекса программ статистического моделирования ядерно-физических процессов **EDMONT**.

3. Сравнение результатов расчета пространственного распределения дозы с экспериментальными измерениями на пучках частиц Синхро-

тронна ЛБС ОИЯИ и расчетами по известным комплексам программ **MAGNET** и **KASCADE** показало правильность разработанной автором методики и возможность использования созданной им программы **EDMONT** для расчетов радиационных тепловыделений в сверхпроводящих элементах ускорителей релятивистских ядер.

4. В типичных геометриях мишени с помощью программы впервые получены данные о:

- вкладах различных компонентов поля излучения в поглощенную энергию;

- роли межъядерного каскада многозарядных фрагментов в развитии ядерно-электромагнитного каскада и в формировании пространственного распределения поглощенной дозы;

- влиянии магнитного поля на альбедо тяжелых многозарядных частиц и на глубинное распределение дозы при высадке иницирующих ядер на поверхность мишени под малыми (1-100 мрад) углами.

5. Проведено моделирование радиационной ситуации, возникающей в системе медленного вывода и суперпериода, при выводе пучков различных ядер из сверхпроводящего ускорителя. Рассчитаны радиационные тепловыделения в обмотках магнитов и линз и оценены допустимые по переходу элементов в нормальное состояние интенсивности частиц в выводимом пучке.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Василев П.Г., Вахненко Б.А., Деев В.И., Зайцев Л.Н., Решетников Г.П., Сырейчиков А.Е., Харитонов В.С. Тепловые процессы и устойчивость сверхпроводящего состояния дипольного магнита при импульсном нагреве обмотки. Инж.-физ.ж., т.Х III, № 2, Минск: Изд-во АН БССР, 1985, с.301-305.
2. Дацков В.И., Зайцев Л.Н., Мунтян С.В., Сырейчиков А.Е., Хвостов В.Б. Измерение поглощенной энергии в элементах магнитов ускорителей с помощью криогенных калориметрических дозиметров. ОИЯИ, 16-84-677, Дубна, 1984.
3. Зайцев Л.Н., Решетников Г.П., Сырейчиков А.Е., Хвостов В.Б. Расчет радиального распределения поглощенной дозы при падении легких ядер под углом 1 мрад на железную мишень. ОИЯИ, 16-85-710, Дубна, 1985.

4. Зайцев Л.Н., Решетников Г.П., Сырейщиков А.Е. Оценки допустимых интенсивностей пучков при настройке сверхпроводящих ускорителей релятивистских ядер. ОИЯИ, 9-86-4, Дубна, 1986.
5. Сырейщиков А.Е. Дифференциальные характеристики альbedo релятивистских ядер в магнитном поле. Десятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 21-23 октября 1986 г. В кн.: Аннотации докладов, ОИЯИ, P9-86-620, Дубна, 1986, с.162.
6. Зайцев Л.Н., Никулин С.П., Сырейщиков А.Е. Оценка радиационных нагрузок при медленном выводе релятивистских ядер из Нуклотрона. Там же, с.150.
7. Зайцев Л.Н., Сырейщиков А.Е., Цовбун В.И. Физические аспекты формирования межъядерного каскада в веществе с магнитным полем при ядро-ядерных взаимодействиях. ОИЯИ, 16-87-821, Дубна, 1987.

Цитированная литература

1. Мереги Ф.Р., Мусульманбеков К.М. Депонир.публ. ОИЯИ БЗ-10-84-873, Дубна, 1984.
2. Зайцев Л.Н. и др. Препринт ОИЯИ P16-12264, Дубна, 1979.
3. Барашенков В.С. и др. Препринт ОИЯИ P2-85-173, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 июня 1989 года.