



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2005–24
На правах рукописи

Язынин Игорь Андреевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
СИСТЕМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОТЕРЬ, ЗАЩИТЫ
И АВАРИЙНОГО СБРОСА ПУЧКА**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2005

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино)

Научный руководитель – кандидат технических наук Ю.С. Федотов
(ИФВЭ, г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.Н.Лебедев
(ИФВЭ, г. Протвино), кандидат технических наук В.А.Михайлов (ОИЯИ,
г. Дубна).

Ведущая организация – Московский инженерно-физический институт
(г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2005 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики
высоких энергий по адресу: 142280, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Создание ускорителей нового поколения – адронных и лептонных сверхпроводящих коллайдеров (LHC, УНК, TESLA) и реконструкция действующих (У-70) выдвигают все возрастающие требования к качеству расчета и проектирования систем, обеспечивающих достижение заданных параметров пучков, стабильность работы ускорителя и уменьшение уровней облучения элементов оборудования и наведенной активности из-за потерь частиц при все увеличивающейся интенсивности и энергии пучков.

Как показывает практика работы действующих циклических ускорителей, наибольшие потери частиц имеют место при инжекции и в начале цикла ускорения (до 20%), при переходе через критическую энергию (до 2%) и при выводе (до 5%). Причинами потерь пучка могут быть неполный захват частиц в режим ускорения, увеличение размеров пучка из-за ошибок ввода, взаимодействие с остаточным газом, нештатные режимы работы оборудования и развитие различных неустойчивостей пучка. Дополнительные потери возникают при работе систем вывода, перевода, аварийного сброса и при взаимодействии встречных пучков в коллайдерах. Оценки показывают, что при проектных параметрах пучков потери одного процента полной интенсивности ($I = 6 \cdot 10^{14}$ *прот./имп.* в УНК) при энергии 400 ГэВ или выше могут привести к радиационному и тепловому разрушению вакуумных камер и магнитного оборудования, а доли процента могут вызвать недопустимый разогрев сверхпроводящих обмоток и переход магнитов в нормальное состояние. Ужесточение норм радиационной безопасности выдвигает также новые требования к созданию систем, защищающих ускоритель и окружающую среду от облучения. Существующие системы перехвата пучка (например, ФЭП в У-70) не всегда отвечают этим современным требованиям.

Поэтому для полноценной работы ускорителя предусматриваются создание и использование системы локализации потерь, которая располагается в одном специально оборудованном месте кольца ускорителя. Она состоит из скрепера, непосредственно перехватывающего гало пучка, коллиматоров, защищающих оборудование от рассеянных частиц, и радиационной защиты, окружающей эти

элементы системы. Дополнительно для уменьшения потерь частиц в кольце и разогрева скрепера могут быть использованы рассеивающие мишени, монокристаллы и резонансы. Система должна перехватывать до нескольких процентов пучка максимальной энергии с условием минимизации выхода протонов в кольцо ускорителя. Вследствие этого в настоящее время большое внимание уделяется выбору конструкции и материалов системы с точки зрения поглощения максимальной величины возможных потерь пучка в ускорителе и оптимальной расстановки коллиматоров для перехвата всех фракций рассеянных высокоэнергетических частиц пучка [1–3, 10–11].

В процессе вывода пучка из циклического ускорителя возникают значительные потери в кольце ускорителя, источниками которых являются элементы вывода: электростатический дефлектор, магнитный септум, магнит Ламберсона, рассеивающая мишень, изогнутый кристалл и т.д. Так, при медленном резонансном выводе пучка в УНК ожидается до 2% потерь от выводимой интенсивности пучка на перегородке электростатического дефлектора [5], а в У-70 имеются 5–10% потерь на дефлекторе и септум-магнитах. При использовании для вывода рассеивающих мишеней и кристаллов потери возрастают до 15–30%. Причем энергия теряемых частиц обычно максимальна для данного ускорителя, что приводит к значительному радиационному загрязнению оборудования кольца.

В любой из систем ускорителя может возникнуть нештатный режим, приводящий к недопустимо большому уровню потерь пучка и к возможному разрушению элементов ускорителя. Поэтому в проектах высокоинтенсивных циклических ускорителей на большие энергии предусматривается создание систем аварийного сброса пучка, которые должны обеспечить быстрый однооборотный вывод пучка полной интенсивности в рабочем диапазоне энергий.

Одной из проблем современных e^+e^- коллайдеров является качественная утилизация провзаимодействовавших пучков, обладающих колоссальной мощностью. Так, для проектируемого коллайдера TESLA средние мощности электронного и позитронного пучков составят по 8 $MВт$, и в дальнейшем при увеличении энергии ускорителя до 800 $ГэВ$ в СМ они возрастут до 16 $MВт$. Поэтому даже незначительная часть пучка, не захваченного каналом вывода, может вызвать серьезное увеличение радиационного фона и даже разрушить оборудование ускорителя. Задача создания каналов вывода в данном случае усложняется из-за значительного увеличения угловых размеров и импульсного разброса пучков после взаимодействия в точке встреч (ТВ).

В процессе работы ускорителей имеются значительные потери частиц пучка, которые необходимо перехватить системами локализации потерь и защиты, чтобы предотвратить разрушение оборудования. Сами элементы систем могут находиться в условиях возможного разрушения из-за значительного разогрева и термомеханических напряжений. Поэтому необходимо уделить внимание выбору материала и конструкций элементов [11, 16]. В современных ускорителях процесс поглощения части или всего пучка носит импульсный характер, а так

как допуск на импульсный разогрев материала значительно ниже стационарного, то необходимо исследовать и мгновенный разогрев рассматриваемого оборудования.

Цель диссертационной работы состояла в разработке методик оптимального проектирования систем локализации потерь, защиты, аварийного сброса пучка и на их основе разработки и исследования систем У-70, УНК, TESLA. В частности, требовалось изучить вопросы формирования пучка с использованием аморфной рассеивающей мишени, монокристаллов, рабочего бетатронного резонанса и определить оптимальные конструкционные параметры и расположение элементов систем в структуре ускорителя для достижения максимальной эффективности и работоспособности перечисленных систем. Необходимо было детально исследовать проблему разогрева элементов рассматриваемых систем при перехвате интенсивных пучков больших энергий и выработать рекомендации по выбору материалов и конструкций коллиматоров, мишеней, скреперов и поглотителей.

Научная новизна

Разработан усовершенствованный метод оптимальной расстановки коллиматоров, перехватывающих частицы, вышедшие из скрепера, в двух поперечных плоскостях с учетом неравновесного импульса, основанный на минимизации потерь частиц в кольце.

Предложена методика исследования эффективности системы локализации потерь, основанная на определении величины потерь протонов, вышедших из системы в кольцо ускорителя.

Определена плотность частиц на кромке скрепера при разных режимах локализации потерь пучка для оценки эффективности системы и исследованы возможные пути по уменьшению плотности. С этой целью исследованы варианты систем локализации потерь с рассеивающей мишенью и монокристаллами и определена их эффективность.

Разработана методика создания канала сброса провзаимодействовавшего пучка, предусматривающая минимизацию количества магнитных элементов и их апертур, с созданием необходимых размеров пучка на поглотителе для предотвращения его разрушения при разных условиях встреч.

Предложена методика определения термомеханической стойкости поглотителей, коллиматоров и мишеней по предельно возможному разогреву в импульсном и стационарном режимах перехвата пучка частиц.

Практическая ценность

В ходе выполнения диссертационной работы были разработаны и исследованы системы локализации потерь, защиты и аварийного сброса пучка УНК и каналов вывода провзаимодействовавших пучков из TESLA-500 (DESY). Произ-

ведено исследование работы системы локализации потерь У-70 и даны предложения по ее оптимизации.

Предложена система защиты для медленного вывода У-70, состоящая из трех коллиматоров и перехватывающая рассеянные протоны, выходящие с электростатического дефлектора.

На основе методики определения термомеханической стойкости поглотителей произведены выбор материалов и разработка конструкций оборудования рассматриваемых систем. Предложены и исследованы новые конструкции коллиматоров, способных перехватывать пучки с мощностью в несколько раз большей, чем обычные прямоугольные коллиматоры. Разработаны конструкции скрепера и поглотителя аварийного сброса УНК для перехвата мощных пучков протонов.

Для решения данного класса задач был создан комплекс программ "SCRAPER", реализующий алгоритм статистического моделирования процесса движения пучка в ускорителе с учетом поперечных и продольных возмущений и взаимодействия частиц с веществом элементов структуры проектируемых установок.

Автор выносит на защиту:

- Разработку методик оптимального проектирования систем локализации потерь и защиты для интенсивных циклических ускорителей.
- Исследование влияния процессов взаимодействия частиц с элементами системы локализации потерь на эффективность ее работы.
- Исследование и оптимизация работы системы формирования эмиттанта пучка на ускорителе У-70.
- Разработку и исследование системы защиты для перехвата возможных потерь при медленном резонансном выводе в У-70.
- Исследование и разработку каналов аварийного сброса и конструкции комплекса поглотителя для проекта УНК-600.
- Разработку каналов вывода линейных коллайдеров больших энергий и интенсивностей для проекта TESLA-500 и их оптимизацию с целью уменьшения потерь.
- Исследование разогрева оборудования рассматриваемых систем и предложение возможных путей увеличения их работоспособности.
- Разработку и исследование новых конструкций коллиматоров, имеющих возможность перехватывать более мощные пучки.
- Исследование и разработку систем локализации потерь с дополнительным использованием бетатронных резонансов и монокристаллов, забрасывающих пучок на скрепер.
- Создание комплекса программ транспортировки пучков в электромагнитных полях и веществе для расчета и разработки систем ускорителя.

Апробация диссертации

Результаты работ, вошедших в диссертацию, докладывались на научных семинарах ИФВЭ, опубликованы в трудах конференций (РАС, ЕРАС) [1,6,7–8, 11–14] и совещаний (DESY,SSC,ИИЕР) [2–4, 9, 15–16], в научных журналах [10, 18], в виде препринтов ИФВЭ [5, 17], а также авторских изобретений [19] и свидетельств об официальной регистрации программ для ЭВМ [20].

Апробация диссертации прошла в ГИЦ ИФВЭ 29 апреля 2005 г.

Структура диссертации

Диссертация изложена на 158 страницах, состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 113 рисунков и 12 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 58 наименований. Нумерация формул, рисунков и таблиц дается по главам.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Изложены новизна результатов и практическая ценность работы. Перечислены положения, выносимые на защиту. Кратко представлено содержание диссертации по главам.

В первой главе приводится описание работы систем локализации потерь, исследуются процессы взаимодействия пучка с ее элементами и анализируются пути уменьшения потерь. Система локализации потерь предназначена для перехвата частиц пучка, которые могут потеряться в кольце, облучая оборудование, и расположена в одном специально оборудованном участке ускорителя с усиленной защитой. Основными задачами, которые необходимо решить при разработке системы, являются:

- максимальный перехват частиц пучка скрепером с мишенью,
- минимизация потерь частиц, вышедших из системы в кольцо ускорителя, с помощью системы защиты, состоящей из коллиматоров,
- предотвращение разрушения элементов системы при значительных энерговыделениях,
- ослабление окружающего радиационного фона.

Рассмотрим процесс перехвата частиц (**рис. 1**) системой локализации потерь, которая может быть использована и для формирования пучка. При взаимодействии частиц с веществом элементов системы образуются потоки вторичных и первичных рассеянных частиц. Вторичные частицы не захватываются в режим транспортировки и теряются на оборудовании вблизи системы, облучая ее. Для их локализации служат коллиматоры и дополнительная внешняя защита, окружающая элементы системы. Часть первичных рассеянных частиц может далеко проникнуть в кольцо ускорителя и попасть на вакуумную камеру, облучая оборудование кольца. Рассмотрим этот процесс более детально.

Заброс частиц на скрепер в циклическом ускорителе в результате образования гало пучка или специального его наведения бамп-магнитами обычно небольшой – несколько микрон [7]. С помощью рассеивающей мишени можно значительно увеличить заброс пучка, уменьшив выход частиц из скрепера, но при этом возникает дополнительный источник излучения – сама мишень.

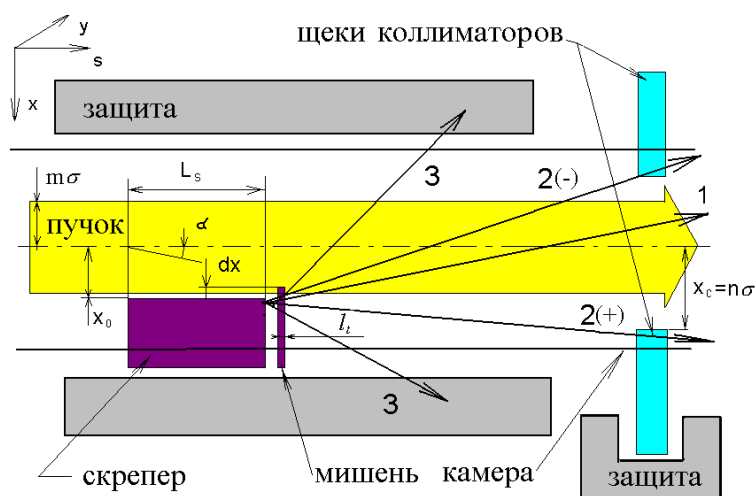


Рис. 1. Схема системы локализации потерь. 1, 2, 3 – фракции рассеянных частиц.

Частицы, попадая на скрепер или на мишень, поглощаются или рассеиваются на некоторый угол с уменьшением энергии. При небольшом рассеянии они через несколько оборотов могут опять попасть на скрепер (фракция 1, рис. 1), или потеряться в кольце, если амплитуда поперечных колебаний частиц больше апертуры ускорителя (фракция 2), а при значительном рассеянии могут попасть на защиту системы (фракция 3). Поэтому наиболее опасной является вторая фракция рассеянных частиц, которая определяет потери вдоль кольца ускорителя. Для ее уменьшения можно использовать коллиматоры, стоящие за скрепером по ходу пучка, которые вместе со скрепером образуют так называемую двухступенчатую систему локализации потерь. Из коллиматоров также выходит значительно уменьшенная фракция первичных рассеянных частиц, которую, в свою очередь, можно подавить дополнительными коллиматорами. Перехват фракций рассеянного пучка необходимо рассматривать в двух направлениях рассеяния на положительные и отрицательные углы в каждой поперечной плоскости, радиальной и вертикальной, и учитывать изменение энергии рассеянных частиц.

Для характеристики качества перехвата частиц системой введем понятия *коэффициента потерь*, который определяется относительной величиной протонов,

вышедших из системы и потерянных в кольце I_{lost} , ко всем перехватываемым – $k_{lost} = I_{lost} / I_0$, и *эффективность системы*, определяемой относительной величиной поглощенных протонов к перехватываемым, – $k_{ef} = 1 - k_{lost}$. Положение щек коллиматоров будет *оптимальным* при минимуме потерь частиц в кольце ускорителя, вышедших из системы.

В диссертации рассматривается новый оптимизационный способ расстановки коллиматоров, перехватывающих частицы, вышедшие из скрепера, в двух поперечных плоскостях с учетом неравновесного импульса, основанный на минимизации потерь пучка в кольце. Разработанная таким образом система защиты состоит из четырех неподвижных в цикле щек коллиматоров, технологична и проста в управлении. Она применима для защиты оборудования кольца от внутренних источников излучения: скрепера, мишени, перегородки дефлектора.

Анализ оптимального положения щек и выбора оптической структуры с определенными параметрами пучка производится из уравнения движения частиц с учетом искажения замкнутой равновесной орбиты и отклонения импульса от равновесного. Из зависимости координат от азимута следует, что перехват частиц системой защиты в каждой из поперечных плоскостей удобно исследовать в трехмерной системе координат, привязанной к месту источника излучения. Тогда образ края любого элемента, в том числе и коллиматора, представляет собой плоскость, а образ камеры ускорителя – поверхность выпуклой фигуры, определяемой образами всех элементов кольца.

Рассеянные частицы должны перехватываться коллиматорами и не попадать на камеру. Для уменьшения потерь в кольце плотность протонов на кромках щек должна быть минимальной. Так как плотность рассеянных частиц падает с увеличением расстояния от пучка, то апертура коллиматоров должна быть максимально возможной, и наклон плоскостей, изображающих края щек, должен быть определен образом камеры ускорителя. Вторым условием для оптимальной расстановки коллиматоров является минимальное уменьшение акцептанса ускорителя, что упрощает управление системой защиты и увеличивает ее надежность.

Из анализа зависимости плотности на кромке щеки коллиматора следует, что потери будут минимальны, если набег фаз бетатронных колебаний между источником и коллиматорами будет полупелым, а амплитудные функции в месте установки коллиматоров – максимальными. Выбор оптимального значения амплитудной функции в месте установки источника зависит от углового и импульсного распределения рассеянных частиц. Дисперсионная функция в месте установки коллиматоров выбирается таким образом, чтобы плоскость, изображающая край щеки, имела определенный наклон для перехвата всех частиц с импульсом, отличным от равновесного.

Для уменьшения количества элементов системы локализации потерь, предлагается использовать один г-образный скрепер, а пучок подводить к нему в двух

плоскостях. Тогда система защиты, состоящая из трех основных коллиматоров, будет перехватывать все фракции рассеянных первичных частиц при локализации гало пучка в обеих плоскостях. Так как щеки коллиматоров расположены на максимально возможном расстоянии от пучка, то они могут быть неподвижными в течение всего цикла ускорения, что упрощает конструкцию коллиматоров и управление системой.

Для увеличения эффективности систем локализации потерь и уменьшения разогрева элементов важным фактором является увеличение заброса частиц пучка на торец скрепера. Поэтому в диссертации определяется параметр заброса частиц при наведении пучка на скрепер с учетом пульсаций орбиты, и рассматриваются возможные пути его увеличения. Так, было найдено, что при наведении пучка размера R_s с постоянной скоростью V на скрепер средняя величина заброса частиц на его торец или *параметр заброса* и нормированная плотность на кромке будут $\Delta_R \approx 1.34\sqrt[3]{V^2 R_s}$, $\rho_{nR} = 0.86 / \Delta_R$. При наличии пульсаций параметр заброса увеличивается. Так, при условии $B/T \gg V$, где B – амплитуда и T – период пульсации, что обычно имеет место при локализации потерь для пульсации орбиты из-за наличия синхротронных колебаний и нестабильности магнитного поля, параметр заброса будет $\Delta_R \approx 4.4 \cdot \sqrt[6]{R_s^2 V \sqrt{B/T}}$. В У70 и УНК-600 параметр заброса на поглотитель из-за наличия пульсаций орбиты увеличивается на порядок до 30–40 мкм.

В диссертации исследуется влияние процессов взаимодействия частиц с элементами системы локализации потерь и защиты на эффективность работы систем и обосновывается выбор материала и толщины мишени. Перечислим основные рассматриваемые процессы взаимодействия частиц с веществом:

- многократное кулоновское рассеяние,
- упругое ядерное взаимодействие,
- неупругое дифракционное взаимодействие,
- неупругое ядерное взаимодействие (рождение s-, g- и b-частиц),
- ионизационное торможение.

Исследование вкладов рассматриваемых парциальных процессов осуществлялось аналитически и на основе численного моделирования с помощью комплекса программ RTS&T [13], блоки которого, связанные с прохождением частиц через вещество, были включены в комплекс SCRAPER [6]. В первых двух типах взаимодействия энергия частиц практически не изменяется. Частицы, рожденные в неупругом ядерном взаимодействии (**рис. 2**), имеют энергию значительно ниже первичной и большие углы эмиссии, и даже если выходят из элементов системы, то в основном попадают на защиту. При дифракционном взаимодействии вторичные тождественные частицы близки к параметрам первичных, и значительная часть частиц этой фракции выходит в кольцо, загрязняя его.

Для иллюстрации вкладов рассматриваемых парциальных процессов на **рис. 3** приведены энергетические зависимости среднеквадратичных углов рассеяния протонов высоких энергий на тонкой медной мишени. Для трех процессов взаимодействия – многократного кулоновского рассеяния, дифракционного и упругого ядерного взаимодействий – видно характерное уменьшение среднеквадратичного угла рассеяния при увеличении энергии как $\sim 1/E$. Среднеквадратичная величина углового рассеяния при дифракционном и упругом ядерном взаимодействиях значительно больше многократного кулоновского (~ 20 раз при толщине медной мишени $l_t = 10$ мм).

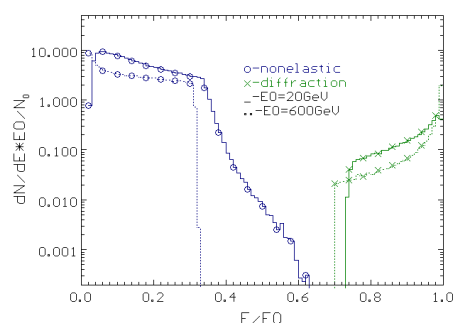


Рис. 2. Энергетический спектр протонов неупругого и дифракционного взаимодействий протона с веществом.

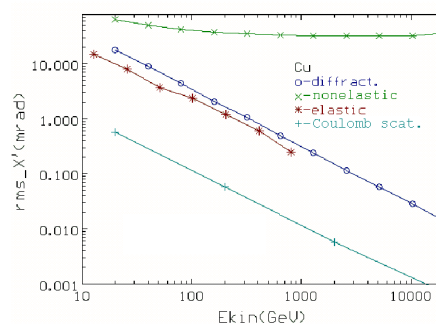


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичных углов рассеяния от энергии для медной мишени.

При энергиях частиц, превышающих 1 ГэВ, макросечения ядерных взаимодействий остаются практически постоянными, и сечение неупругого взаимодействия в ~ 2 раза больше сечений упругого ядерного и в ~ 5 раз – дифракционного взаимодействий. С увеличением атомного номера элемента величины макросечений растут. При ионизационном торможении энергия частиц уменьшается пропорционально их пути в веществе.

В диссертации рассматривается влияние процессов взаимодействия частиц с веществом на эффективность системы локализации потерь с мишенью. Для оценки углового распределения частиц, рассеянных тонкой мишенью, можно рассматривать как сумму фракций частиц, участвующих в вышеописанных процессах:

$$\rho(x') \approx e^{-l_t/L_{non}} \cdot \sum_{k=c,el,d} W_k \rho_k(x'),$$

где W_k и $\rho_k(x')$ – относительное количество частиц, участвующих в рассматриваемом k -ом процессе, и их угловое распределение. Для заброса пучка мишенью используется многократное кулоновское рассеяние. Процессы упругого ядерно-

го взаимодействия и дифракции в основном увеличивают величину потерь в кольце, а неупругое ядерное – уменьшает. Поэтому первоначально рассматриваются потери, определяемые многократным кулоновским рассеянием, а остальные процессы вносят дополнительный вклад, т.е. нормированная плотность потерь по амплитуде поперечных колебаний и потери в кольце определяются

$$\rho_A = \rho_{c,A} \cdot (1 + \xi_{d,A} + \xi_{el,A}), \quad P \approx \rho_{A_m} \cdot \Delta A,$$

где $\rho_{c,A}$ – часть плотности потерь из-за кулоновского рассеяния, ΔA – возможное искажение орбиты в кольце. Парциальные величины плотности потерь, определяемые упругим ядерным $\rho_{el,A} = \rho_{c,A} \cdot \xi_{el,A}$ и дифракционными взаимодействиями, возрастают с увеличением энергии пучка как $\sim E^4$. Поэтому при больших энергиях использование рассеивающей мишени может не дать желаемого уменьшения потерь. Так как $\xi_{k,A} \sim L_r / L_n$, то минимальные потери, вносимые упругим ядерным и дифракционными взаимодействиями, будут при использовании мишеней из тяжелых материалов типа *W*. При использовании алюминиевой мишени фракции потерь от вышеперечисленных взаимодействий возрастут в шесть раз.

Для У70 наибольшие потери имеются в вертикальной плоскости, вследствие меньшего размера камеры. При оптимальной толщине *W* мишени величина $\xi_{el,A} \approx 0.12 \cdot 10^{-7} E^4$, т.е. во всей области энергий пучка процессы упругого ядерного взаимодействия вносят незначительный вклад в увеличении плотности потерь. Основные потери определяются многократным кулоновским взаимодействием протонов с веществом мишени $P \approx \rho_{c,A} \cdot \Delta A$. При возможных искажениях орбиты $\Delta A \sim 5 \text{ мм}$ ожидаемые потери в кольце от мишени составят $P \approx 0.7 \cdot 10^{-2}$ от локализуемой интенсивности пучка. В УНК-600 при инжекции и в начале цикла ускорения ($E \leq 100 \text{ ГэВ}$) потери в кольце определяются многократным кулоновским взаимодействием протонов на мишени: $P \approx 4 \cdot 10^{-7}$, при величине $\Delta A \sim 1 \text{ мм}$. При энергии вывода величина потерь возрастает более чем на два порядка за счет упругого ядерного и дифракционного взаимодействий.

Во второй главе дается методика разработки комплекса аварийного сброса и каналов транспортировки пучка. Представляется описание комплекса аварийного сброса (для проекта УНК-600), который обеспечивает быстрый однооборотный (70 мкс) вывод пучка протонов в диапазоне энергий 70–600 ГэВ интенсивностью $I = 6 \cdot 10^{14} \text{ прот./имп.}$, с детальным расчетом параметров пучка на поглотителе. Сброс пучка происходит после прихода сигнала с диагностического оборудования, фиксирующего нестандартную работу систем ускорителя. Спроектирована быстрая электроника сбора и анализа аварийного сигнала, приходящего практически с любой точки кольца ускорителя, которая запускает им-

пульсные магниты в течение 1–2 оборотов пучка. Расположение и параметры магнитных элементов системы аварийного вывода должны обеспечивать транспортировку пучка с учетом возможного увеличения его поперечных размеров при аварийной ситуации и требуемый размер пучка на аварийном поглотителе, необходимый для предотвращения разрушения керна поглотителя при многократном сбросе за каждый цикл ускорения пучка полной интенсивности [9]. Размеры графитового керна поглотителя определяются из условия предотвращения его разрушения вследствие радиационных эффектов и термомеханических стрессов, сопровождающих развитие адронного межъядерного каскада.

В процессе сотрудничества ИФВЭ в международном проекте TESLA (DESY, Гамбург), в который автор внес существенный вклад, были разработаны и исследованы каналы провзаимодействовавших пучков и элементы защиты [14–16]. Задача создания каналов вывода усложняется из-за значительного увеличения угловых размеров и импульсного разброса пучков при взаимодействии в точке встреч (ТВ). Для подавления эффекта возрастания размеров провзаимодействовавших пучков встречные пучки формируют ленточными ($\sigma_x \times \sigma_y = 500 \times 5 \text{ нм}$). Моделирование взаимодействия пучков производилось по коду GUINEA PIG, разработанному в DESY.

В диссертации рассматривается методика создания технически реализуемого канала вывода с наиболее возможной пропускной способностью пучка или *эффективностью* с условием приемлемых его размеров на поглотителе и в магнитных элементах канала. *Эффективность* канала зависит в основном от положения и апертуры первой линзы. Произведенные аналитические исследования показали, что при использовании квадрупольной септумной линзы с апертурой $\Delta_Q \approx 70 \text{ мм}$ пропускная способность канала составит 99.9%. При использовании обычной квадрупольной линзы вертикальная апертура увеличится более чем в два раза для проводки пучка такой же интенсивности ($\Delta_Q \approx 150 \text{ мм}$), а также более чем в два раза увеличатся апертуры магнитных элементов канала и поперечный размер поглотителя.

Для минимизации количества магнитных элементов и их апертур, с созданием необходимых размеров пучка на поглотителе для предотвращения его разрушения при разных условиях встреч, была разработана методика оптимизации канала вывода провзаимодействовавшего пучка. Ввиду большого импульсного разброса и углового размера исходного пучка, при расчете системы удобно рассматривать движение частиц от начальной точки до рассматриваемой с помощью передаточных матриц $M_{ij}(p)$ и дисперсионной функции $\eta(p)$, зависящих от импульса или энергии. Следовательно, размеры пучка в рассматриваемых местах канала являются функцией от импульса и определяются исходным угловым и импульсным размером пучка, и их можно менять путем варьирования количества, сил и положения линз и магнитов.

Правильность выбора апертуры элементов и их поперечного положения, а также координат щек коллиматоров можно оценить по отображению апертур элементов и частиц пучка на плоскости одного из поперечных углов и отклонения импульса в ТВ [15]. Такое рассмотрение возможно ввиду того, что исходные поперечные размеры пучка малы и практически не влияют на его размеры в элементах. Тогда угол частицы в ТВ, которая попадает на границу камеры при определенном импульсе p : $\Delta z'(S, p) = (z_c(S) - \eta(S, p) \cdot \delta) / M_{12}(S, p)$, где $z_c(S)$ – расстояние края камеры от трассы соответствующей равновесному импульсу.

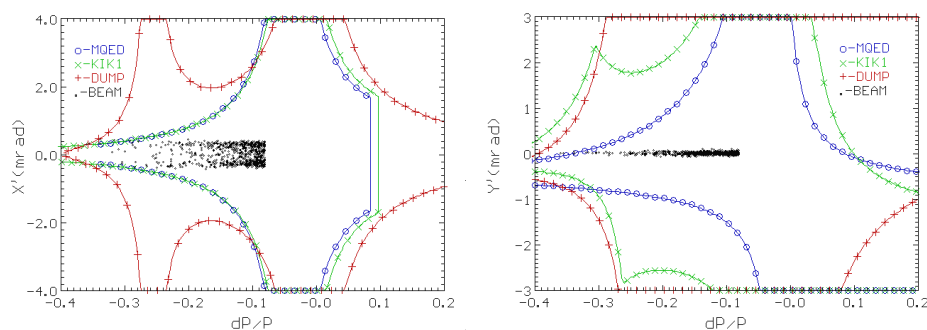


Рис. 4. Образы камер элементов и пучков в ТВ на плоскостях (X', δ) и (Y', δ) .

Границы камер, чтобы на них не попадали выводимые частицы, должны быть расположены в области, перехватываемой коллиматором, или вне области, где возможен пучок. Таким образом, можно найти минимальные апертуры элементов с учетом необходимой интенсивности пропускаемого пучка и визуально увидеть предполагаемые потери из-за нестабильности положения пучка, которое выразится в изменении положения и размеров портретов пучков на соответствующих плоскостях.

На приведенном выше рис. 4 видно, что образы щек основного коллиматора MQED, стоящего вначале канала, находятся внутри остального оборудования. То есть, какое бы ни было начальное распределение пучка, частицы не попадают на магниты канала, а перехватываются коллиматором. Значительной проблемой при создании лептонных линейных коллайдеров является защита оборудования от γ – излучения, возникающего в точке встреч. Кроме защиты самих ускорителей, необходимо защитить головные элементы каналов взаимодействовавших пучков. Наиболее подверженным радиационным и тепловым нагрузкам от данного типа излучения оказывается септум-магнит. Для оценки возможного разогрева перегородки автором предложен способ расчета, основанный на определении мощности излучения, выделяемой на ней за время эксперимента, при оп-

ределенных параметрах пучков в ТВ. Проектная область изменения вертикального офсета в рабочем режиме коллайдера соответствует $\Delta y = \pm 0.5\sigma_y = \pm 2.5 \text{ нм}$. В этом случае при равномерной плотности вероятности вертикального отклонения пучков выделяемая мощность составит $\bar{P} = 1.7 \text{ кВт}$, что приводит к необходимости защиты перегородки охлаждаемым коллиматором.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с разогревом поглотителей, коллиматоров и мишеней пучком и особенностями их конструкций. Предлагается методика определения термомеханической стойкости коллиматоров и мишеней по предельно возможному разогреву в импульсном и стационарном режимах перехвата частиц.

Обычно коллиматор и скрепер состоят из поглотителя, выполненного из радиационно-стойкого материала, на который непосредственно попадают частицы пучка, системы теплоотвода, примыкающей к боковой поверхности поглотителя, и окружающей защиты. Наиболее простой подход к исследованию процессов, происходящих в коллиматорах, состоит в первоначальном рассмотрении цилиндрического поглотителя с падающим радиально-распределенным пучком, центр которого совпадает с его осью. Тогда распределения энерговыделения и температуры в поперечной плоскости будут зависеть только от одного параметра – радиуса r . Продольный размер поглотителя выбирается значительно больше поперечного, поэтому задачу разогрева поглотителя можно рассматривать отдельно в каждом поперечном сечении поглотителя на некотором расстоянии z от входа пучка. Зная нормированную плотность энерговыделения dE/dV для точечного пучка заданной энергии E_0 , интенсивность I , поперечное распределение и временную структуру сброса пучка, граничные условия, материал и размеры поглотителя, можно найти его разогрев в процессе работы ускорителя.

Трехмерное распределение плотности энерговыделения при мгновенном взаимодействии точечного параллельного пучка с полубесконечной средой может быть представлено радиально-симметричной функцией:

$$P(r, z) = I \frac{dE}{dV}(r, z), \quad \frac{dE}{dV}(r, z) = \frac{dE(z)}{dz} f(r, z), \quad \int_0^\infty \frac{dE(z)}{dz} dz = \eta E_0, \quad \eta \approx 1.$$

Энерговыделение для произвольного пучка будет определяться сверткой двух функций: нормализованного энерговыделения точечного пучка и плотностью падающего пучка $\rho(x, x', y, y')$. Точка с максимальной плотностью накапливаемой энергии для симметричных пучков, попадающих в центр поглотителя, будет лежать на его оси вблизи максимального продольного энерговыделения каскада. По ее значению можно найти мгновенный (за импульс) максимальный разогрев поглотителя, а решая уравнение теплопроводности с граничными условиями, определить наибольшую температуру, до которой он разогревается за большое количество сбросов, и, зная допуски на разогревы данного материала,

оценить максимально возможную интенсивность перехватываемого пучка. Коллиматор можно представить половиной цилиндрического поглотителя, процесс разогрева которого будет аналогичен разогреву поглотителя с дополнительным учетом выхода энергии в виде излучения с внутренней поверхности.

В качестве воздействующего источника рассматривались электронные, позитронные, фотонные и протонные пучки. Расчетные данные по программным комплексам RTS&T и EGS4 показали, что для точечных лептонных пучков с энергией выше 100 МэВ аппроксимационной функцией радиального распределения энерговыделения будет двухэкспоненциальная функция. Были получены аналитические зависимости максимально перехватываемой интенсивности пучка в импульсном и стационарном режимах для широко используемых радиационно-стойких материалов по предельно возможному разогреву.

Из анализа данных, сведенных в таблицу, даются рекомендации по выбору материалов оборудования рассматриваемых систем (УНК, TESLA). Так, для перехвата узких интенсивных пучков как в импульсном, так и в стационарном случае предпочтительнее использовать алюминий, а для перехвата широких интенсивных пучков могут быть использованы более тяжелые материалы (*Fe*, *Cu*). Практически поглотители коллиматоров на рассеянные вторичные пучки разрабатываются из этих материалов. Поглотители из графита и бериллия имеют возможность перехватывать пучки на порядок интенсивнее, но из-за конструктивной сложности и загрязнения вакуума в качестве элементов локализации потерь эти материалы обычно не используются, а применяются в качестве поглотителей аварийного сброса и вакуумных окон.

В ускорителях с большой энергией пучка обычные коллиматоры могут не выдерживать тепловых и механических нагрузок [16], поэтому в диссертации предлагаются и исследуются некоторые конструкции коллиматоров, в которых разогрев уменьшается. Расчетные данные коллиматора с продольными выемками (вариант Е) показали, что максимальная плотность энерговыделения в зависимости от увеличения длины ΔL уменьшится в $k_d = (1 + \eta \cdot \Delta L / L_0)$ раз, где коэффициент $\eta \sim 1.5$, а L_0 – длина обычного прямоугольного коллиматора. Мгновенный и стационарный разогрев коллиматора снизится практически во столько же раз. Так, стационарный разогрев первого прямоугольного коллиматора из алюминия в разработанном диссертантом электронном канале с виглером при попадании на него пучка с забросом $\Delta_R \sim 3$ мм и интенсивностью 1% от полной $I_0 = 2 \cdot 10^{14}$ составит 240° С. С учетом нестабильности положения пучков в ТВ потери могут возрасти в ~3 раза, и коллиматор разрушится. При использовании предлагаемого типа коллиматора (Е), имеющего длину в два раза большую (4 м), разогрев уменьшится в три раза, что достаточно для его надежной работы.

Также рассматривается выбор конструкционных материалов рассеивающей мишени и скрепера с точки зрения термомеханической стойкости при разных условиях перехвата частиц пучка, и приводится расчет разогрева этих элементов

для УНК. Представлена разработанная автором конструкция скрепера и комплекса аварийного поглотителя пучка УНК-600.

В четвертой главе предлагаются методики исследования эффективности системы локализации потерь и разработки систем защиты от внутренних источников излучения в модернизируемых ускорителях. Исследуется процесс локализации потерь пучка в У-70, и даются предложения по увеличению эффективности системы. Для защиты оборудования от облучения при медленном выводе и снижения радиационного фона в У-70 предлагается система защиты для перехвата протонов, проваимодействовавших с электростатическим дефлектором. Исследуется эффективность систем формирования пучка с использованием изогнутых кристаллов и бетатронных резонансов.

Методика исследования эффективности системы локализации потерь основана на определении величины потерь протонов, вышедших из системы в кольцо ускорителя. Потери в кольце уменьшаются посредством перехвата гало пучка интенсивности I_0 одним скрепером $k_{lost0} = I_{lost0} / I_0$. Дополнительное увеличение заброса частиц на торец скрепера мишенью или другим способом снижает потери в k_p раз, а использование коллиматоров – еще в k_c раз, т.е. суммарная оценка коэффициента уменьшения потерь в кольце составит $k_{lost} = k_{lost0} \cdot k_p \cdot k_c$. Величину потерь удобно определять через нормированную плотность от амплитуды поперечных колебаний P_A при амплитуде, соответствующей акцептансу ускорителя. Тогда коэффициент потерь определится $k_{lost0}(E) \approx P_A(E) \times \Delta A_{or}$, где ΔA_{or} – характерное искажение орбиты.

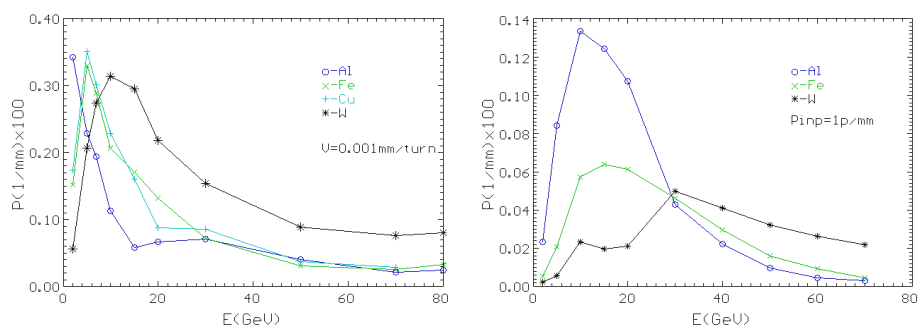


Рис. 5. Зависимости плотности потерь от энергии протонов для скреперов из разных материалов: а) формирование пучка, б) равномерная плотность на кромке скрепера.

Зависимости плотности потерь, полученные моделированием процесса перехвата частиц в У-70 (см. **рис. 5**), определяют потери при формировании пучка одним скрепером (а) и с дополнительным забросом пучка на скрепер, например

с мишенью. Расчеты показали, что при скоростях наведения пучка $V \leq 10^{-2}$ мм/оборот величины потерь меняются незначительно во всем диапазоне энергий, т.е. для оценки потерь при локализации потерь пучка достаточно произвести компьютерный расчет с определенной скоростью формирования пучка ($V = 10^{-3}$ мм/оборот). Из поведения зависимостей видно, что интенсивность вышедших из системы рассеянных протонов, которые теряются в кольце, падает с увеличением энергии, что объясняется уменьшением углов многократного кулоновского рассеяния протонов. В области энергий 2–10 ГэВ наблюдаются пики по плотности потерь, которые определяются увеличением доли рассеянных частиц в области акцептанса.

Из вышеприведенных рисунков видно, что в качестве поглотителя скрепера для возможных энергий пучка подходят все материалы, за исключением материалов с большим атомным номером (типа *W*), при использовании которых потери в кольце возрастают в 2 и более раз при $E = 40 \div 70$ ГэВ, что объясняется также увеличением выхода рассеянных протонов в область акцептанса при малых забросах пучка. В случае использования более легких материалов значительная часть частиц с малым забросом рассеивается на кромке скрепера, как на мишени, и через один или несколько оборотов поглощается скрепером.

Для оценок потерь при больших забросах пучка удобно ввести эквивалентную плотность частиц $P_{eq_P} = P_{inp1} \cdot P_{out0} / P_{out1}$ [мм⁻¹], соответствующую равномерной плотности перехватываемых частиц определенной энергии на кромке скрепера, при которой плотность потерь будет такой же, как и при малых забросах (P_{out0}). Таким образом, зная начальную нормированную плотность распределения частиц на кромке скрепера P_{inp} , полученную рассеянием на мишени или другим способом, можно оценить коэффициент уменьшения потерь в кольце: $k_P = P_{inp} / P_{eq_P}$. Так же можно оценить коэффициент уменьшения потерь в кольце ускорителя k_c при использовании коллиматоров, полностью перехватывающих рассеянные протоны, вышедшие из скрепера: $k_c \sim P_{inp1} / P_{out1}$. Для У-70 коэффициент уменьшения потерь в кольце при использовании коллиматоров в зависимости от энергии пучка составит (рис. 5б): $k_c = 1.5 \cdot 10^2 \div 6 \cdot 10^3$. Для перехвата протонов, вышедших из скрепера и мишени в У-70, была разработана по ранее изложенной методике система защиты, состоящая из 4 однощелевых коллиматоров. Она дополнительно дает возможность более чем на два порядка снизить потери частиц, рассеянных системой в кольце ускорителя. В дальнейшем ускорителе для установки коллиматоров можно использовать имеющиеся свободные промежутки при заданной структуре. Коллиматоры желательно устанавливать вне области бампа наведения, чтобы не было зависимости положения щек от режима работы системы, и как можно ближе к скрепе-

ру. Первоначально рассмотрим процесс перехвата пучка системой защиты на плоскостях (δ, R') и (Z, Z') в месте расположения скрепера (рис. 6, 7), где образ камеры ускорителя (ABCD), область взаимодействия циркулирующего пучка 6 и образы краев предлагаемых коллиматоров, имеющих вид прямых линий. Частицы, находящиеся за этими линиями от пучка, перехватываются основными коллиматорами (области 1, 2). Частицы из области 3, 4 попадают на дополнительные коллиматоры или на вакуумную камеру в месте расположения системы защиты.

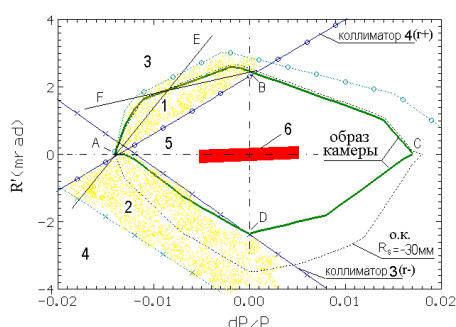


Рис. 6. Образы щек коллиматоров и камеры на плоскости (δ, R') .

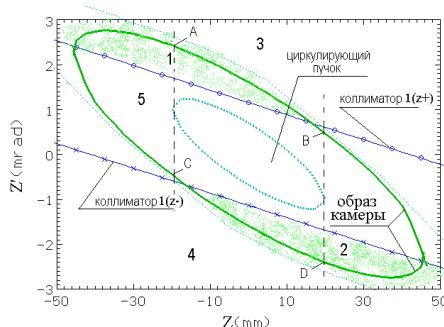


Рис. 7. Образы щек коллиматоров на фазовой плоскости (Z, Z') .

При оптимальном положении коллиматоров, во-первых, образы краев щек должны иметь определенный угол наклона для максимально возможного перехвата всех фракций опасных частиц. Во-вторых, плотность перехватываемых рассеянных протонов на кромках щек должна быть минимальна для увеличения эффективности системы. В-третьих, коллиматоры практически не должны уменьшать акцептанс ускорителя при разных режимах его работы.

Оптимальный угол наклона можно выбрать по точкам, изображающим образ камеры ускорителя на соответствующей плоскости. Для уменьшения плотности перехватываемых протонов на кромках щек они должны быть установлены по возможности дальше от равновесной орбиты. Так как при взаимодействии с системой частицы теряют энергию, то достаточно рассматривать перехват пучка на полуплоскости $\delta < 0$. Линии АВ и AD (рис. 6), соединяющие крайние точки образа камеры ускорителя, будут соответствовать оптимальному положению краев щек коллиматоров, перехватывающих протоны, рассеянные в радиальной плоскости. Оптимальное положение краев щек основных коллиматоров в вертикальной плоскости соответствует линиям АВ и CD (рис. 7), проходящим через точки пересечения крайних рассеянных частиц пучка и образа камеры ускорителя.

Таким образом, для оптимального определения положения основных коллиматоров достаточно рассмотреть по три зависимости от азимута в радиальной и

вертикальных плоскостях, характеризующих плотности перехватываемых протонов, положение щек коллиматоров на рассматриваемых выше плоскостях и изменение акцептанса (рис. 8). Зависимости $Pr(s)$ и $Pz(s)$ пропорциональны плотности рассеянных протонов на краях щек коллиматоров. Для уменьшения потерь в кольце коллиматоры желательно устанавливать в места с малыми значениями этих функций. Промежутки 88–90 и 93–96 удовлетворяют этим требованиям в обеих плоскостях. Из поведения зависимости $dR'/(dP/P)$ видно, что в области от скрепера до магнита 91QD наклон линии отрицателен, и коллиматоры, расположенные там, целесообразно использовать для перехвата протонов, рассеянных на отрицательные углы в радиальной плоскости. За магнитом 92QF наклон линий положителен, и коллиматоры, установленные за ним, можно использовать для перехвата протонов, рассеянных на положительные углы.

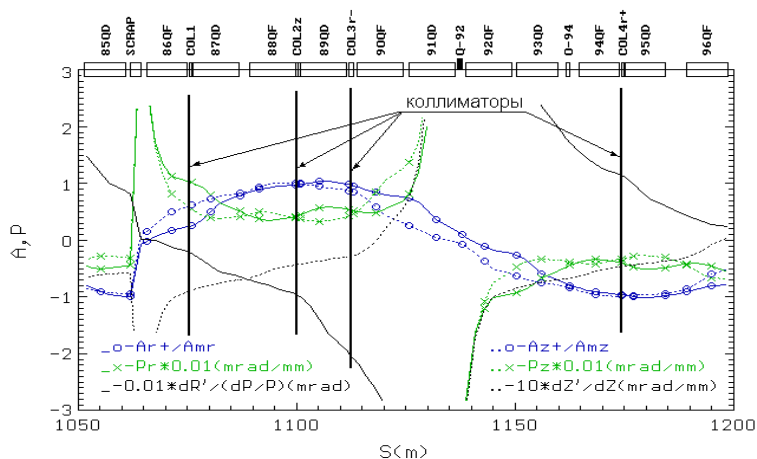


Рис. 8. Зависимости, характеризующие положение щек коллиматоров.

С учетом вышесказанного два однощечковых радиальных коллиматора предполагается установить в промежутках 90 и 95 (COL3,4 рис. 6, 8). Аналогично, по рассмотренной методике для перехвата протонов, рассеянных на положительные и отрицательные вертикальные углы, предполагается установить основной вертикальный коллиматор в промежутке 89 (COL2, рис. 7, 8) с двумя щекми, расположенными на расстоянии $z_c = \pm 30$ мм от равновесной орбиты. Уменьшение акцептанса при таком положении щек основных коллиматоров будет незначительным ~ 0.9 , что дает возможность проектировать щетки коллиматоров неподвижными в течение цикла работы ускорителя, а это значительно упрощает управление и увеличивает надежность системы. При локализации потерь пучка в вертикальной плоскости в У-70 частицы, вышедшие из системы, пере-

хватываются этими же основными коллиматорами. Для уменьшения радиационной нагрузки на ближайшие к скреперу элементы предлагается использовать дополнительный коллиматор COLL1, который будет установлен за первым магнитом по ходу пучка от скрепера.

Окончательно для проверки правильности расстановки коллиматоров производилось компьютерное моделирование процесса формирования пучка разных энергий в У-70 с реальными магнитными полями и апертурами элементов. Из анализа полученных распределений потерь можно сделать вывод, что при использовании коллиматоров величина потерь в кольце уменьшается на два порядка и более. Численное моделирование с использованием абсолютно поглощающих коллиматоров показало, что в этом случае в кольце не наблюдается потерь рассеянных протонов, вышедших из скрепера с мишенью. Потери в кольце определяются только рассеянными частицами, вышедшими из коллиматоров. Моделирование процесса показало, что коллиматорами перехватывается до 7% рассеянных протонов от интенсивности локализуемых при энергии инжекции и до 1% – при энергии вывода. Разогрев коллиматоров будет незначителен, ввиду небольшой перехватываемой интенсивности, и их можно изготавливать практически из любого радиационно-стойкого материала. Для экономии места, где это необходимо, разумно использовать для щек тяжелые материалы с небольшой ядерной длиной.

Для защиты оборудования от облучения при медленном выводе и снижения радиационного фона в У-70 предлагается система защиты для перехвата протонов, провазимодействовавших с электростатическим дефлектором. Методика построения системы защиты, состоящей из четырех щек коллиматоров, перехватывающих все фракции рассеянных протонов от источника излучения, аналогична методике разработки системы защиты локализации потерь, рассмотренной ранее. Дополнительно необходимо создать условия, чтобы коллиматоры не влияли на циркулирующий и выводимый пучок, т.е. они должны быть расположены вне рабочих областей пучков.

Основные потери при модернизированном медленном выводе имеются на перегородке электростатического дефлектора (ЭД, ED-106 на **рис. 9**), которая разделяет циркулирующий 2 и выводимый пучок 3. Пучок подводится к дефлектору бампом в радиальной плоскости 1, например путем изменения полей магнитов (103, 109, 112). Частицы, заброшенные резонансом третьего порядка в апертуру дефлектора, отклоняются им, попадают в зазоры септум-магнитов и выводятся из ускорителя.

Для оптимального расположения коллиматоров их апертуры и угол наклона образцов краев щек выбираются таким образом, чтобы они перехватывали все протоны, определяющие потери в кольце, при минимальном уменьшении рабочей области пучка. Так, коллиматоры, стоящие в свободных промежутках 109

(COL_E2, $r_c = -70\text{ мм}$) и 113 (COL_E3, $r_c = -60\text{ мм}$), перехватывают фракции частиц, рассеянных на отрицательные и положительные радиальные углы.

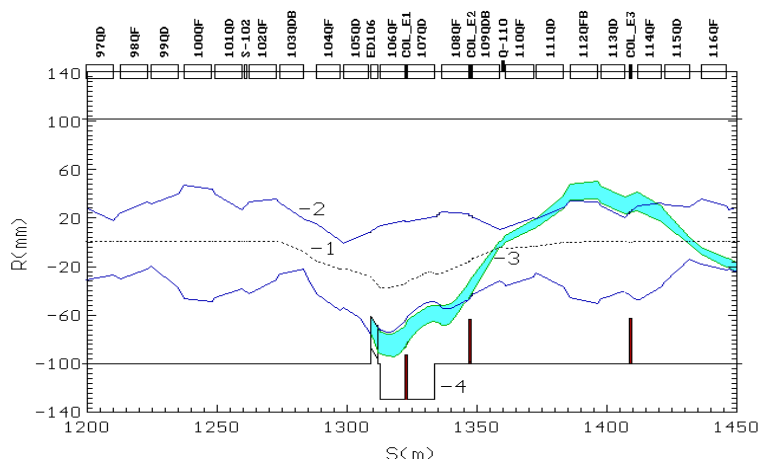


Рис. 9. Расположение элементов защиты и пучки при медленном выводе: 1 – равновесная орбита; 2 – циркулирующий пучок; 3 – выводимый пучок; 4 – вакуумная камера.

В вертикальной плоскости две щеки коллиматора, установленного в промежутке 109 (COL_E2, $z_c = \pm 30\text{ мм}$), перехватывают все частицы, рассеянные в вертикальной плоскости, которые могут потеряться в кольце ускорителя. Причем верхняя щека перехватывает протоны, рассеянные на положительные углы, а нижняя – на отрицательные. Для уменьшения потерь высокоэнергетичных протонов в области от источника до коллиматора COL_E3 устанавливается дополнительный однощечковый коллиматор COL_E1. Он также перехватывает значительную часть вторичных частиц и защищает магнит 107QD.

Дополнительную возможность учета влияния системы защиты на процесс медленного вывода дает рассмотрение пучков и щек коллиматоров на радиальной фазовой плоскости (R, R') в месте расположения ED (**рис. 10**). Циркулирующий пучок 3 должен быть расположен внутри образа камеры ускорителя 1, касаться электростатического дефлектора 4 и не пересекать образов щек коллиматоров 5–7, чтобы не было прямых потерь пучка на них. Выводимый пучок 8 также не должен касаться щек коллиматоров. Изменение режимов работы медленного вывода – изменение сил секступольных и квадрупольных линз, положения равновесной орбиты, апертуры выводных элементов и т.д., может привести к тому, что положение пучков, их размеры и положение образов щек и камеры будут меняться, и протоны циркулирующего или выведенного пучков непосред-

ственно попадут на коллиматоры или в камеру. В этом случае необходима корректировка поперечного положения щек коллиматоров и, вероятно, параметров элементов вывода.

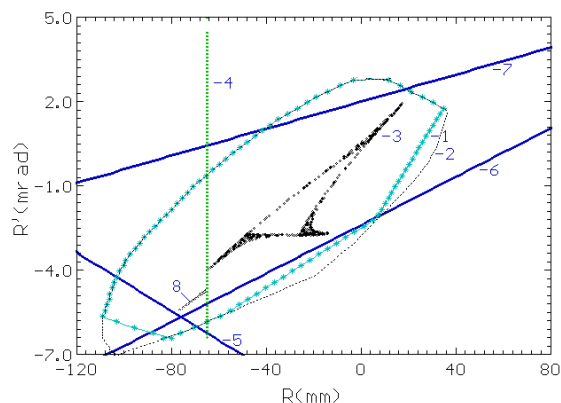


Рис. 10. Образы коллиматоров и пучки на плоскости (R, R') в месте расположения ED: 1 – образ камеры; 2 – образ камеры без учета элементов вывода; 3 – циркулирующий пучок, 4 – электростатический дефлектор, 5, 6, 7 – образы щек, 8 – выводимый пучок.

Окончательно для проверки работы системы защиты производилось численное моделирование процесса медленного вывода с коллиматорами и без них. Из анализа распределения потерь следует, что с использованием системы защиты величина потерь уменьшается в 3 раза в области между первым и последним коллиматорами и более чем на два порядка – в кольце ускорителя.

Для уменьшения радиационных нагрузок на окружающее оборудование и фона необходимо предусмотреть внешнюю радиационную защиту коллиматоров. Решение задачи выбора конструкции и материала защиты не вошло в диссертацию. Обычно она решается путем детального анализа и компьютерных вычислений процесса взаимодействия, полученных распределенных источников излучения, с коллиматорами, окружающим оборудованием и предполагаемой защитой.

В диссертации производится исследование работы и дается аналитическая оценка эффективности систем локализации потерь с использованием монокристаллов и рабочего бетатронного резонанса для увеличения заброса частиц пучка на скрепер с целью уменьшения выхода частиц из системы в кольцо и облучения окружающего оборудования. Так, для У-70 компьютерные расчеты и аналитический анализ показывают, что с помощью эффекта каналирования в изогнутых кристаллах можно уменьшить потери на порядок и более на средних и

высоких энергиях. Впервые было предложено использование эффекта объемного отражения частиц в кристаллах для увеличения эффективности системы. Разогрев кристаллической мишени пучком будет такой же, как и для обычной аморфной мишени, т.е. намного меньше, чем при использовании эффекта каналирования. Особенно эффективно применение такой мишени на высоких энергиях. Так, численные расчеты показывают, что использование мишени, состоящей из двух кристаллов, в УНК-600 дает возможность уменьшить потери в кольце на порядок и более по сравнению с использованием вольфрамовой мишени.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

- Разработан новый метод оптимальной расстановки коллиматоров, перехватывающих частицы, вышедшие из скрепера, в двух поперечных плоскостях с учетом неравновесного импульса, основанный на минимизации потерь пучка в кольце.
- Исследовано влияние взаимодействия частиц с элементами системы локализации потерь и защиты на эффективность работы систем, и рассмотрены способы оптимального их проектирования.
- Предложена методика исследования эффективности системы локализации потерь, основанная на определении величины потерь протонов, вышедших из системы в кольцо ускорителя. Исследован процесс перехвата пучка в У-70 при разных скоростях наведения частиц на скрепер во всем диапазоне энергий. На основе анализа эффективности системы даны рекомендации по выбору радиационно-стойких материалов для изготовления скрепера (*Fe, Cu*), мишени (*W*) и коллиматоров (*Fe, Cu*). Также было показано, что использование вольфрамовой мишени переменной толщины в зависимости от энергии пучка уменьшает потери на порядок. Разработанная система защиты, состоящая из 4 однощелевых коллиматоров, дополнительно дает возможность более чем на два порядка снизить потери рассеянных системой частиц в кольце.
- Ввиду планируемого увеличения интенсивности пучков до $I = 3 \cdot 10^{13}$ протон/цикл в У-70, предложена система защиты для медленного вывода, состоящая из трех коллиматоров и перехватывающая рассеянные протоны, выходящие с электростатического дефлектора. Расчеты показали, что использование системы защиты уменьшит потери в кольце ускорителя более чем на два порядка.
- Разработана система локализации потерь для УНК с *W* мишенью и *Cu* поглотителем, которая позволяет в квазистационарном режиме локализовать до 10% пучка интенсивностью $6 \cdot 10^{14}$ *p* при $E = 70$ ГэВ и до 1%

при $E = 600 \text{ ГэВ}$, а в аварийной ситуации из-за возможности разрушения вольфрамовой рассеивающей мишени – до не более 2% .

- Разработана система аварийного сброса пучка УНК, обеспечивающая вывод пучка протонов максимальной интенсивности во всем диапазоне энергий работы ускорителя.
- Предложена методика определения термомеханической стойкости поглотителей, коллиматоров и мишеней по предельно возможному разогреву в импульсном и стационарном режимах перехвата пучка частиц. На ее основе даются рекомендации по выбору материалов оборудования рассматриваемых систем (УНК, TESLA).
- Предложены и исследованы новые конструкции коллиматоров, способных перехватывать пучки с мощностью в несколько раз большей, чем обычные прямоугольные коллиматоры. Разработаны конструкции скрепера и поглотителя аварийного сброса УНК для перехвата мощных пучков протонов.
- Разработаны и оптимизированы каналы вывода электронных и позитронных пучков линейного коллайдера TESLA-500 с эффективностью 99.9%. Предложена методика разработки системы защиты для каналов вывода пучков с большими угловыми размерами и импульсным разбросом.
- Предложены и исследованы варианты систем локализации потерь с применением бетатронных резонансов и монокристаллов, с помощью которых пучок забрасывается на скрепер.
- Для разработки систем создан комплекс программ SCRAPER, позволяющий моделировать, анализировать и оптимизировать работу систем.

Список литературы

1. Drozhdin A., Maslov M., Mokhov N., Fedotov Yu., **Yazynin I.** Calculation of Losses and Protection against Irradiation during Beam Abort and Losses Localization in the UNK. PAC, Chicago, 1989, v.1, p.255-258.
2. Дрождин А.И., Маслов М.А., Федотов Ю.С., **Язынин И.А.** Расчет потерь и защита от облучения при аварийном сбросе и локализации потерь в УНК. Труды XI Всесоюзного совещания ускорителей заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1989.
3. M.A.Maslov, N.V.Mokhov, **I.A.Yazynin.** The SSC beam scraper system. SSCL-484. 1991, 47 pp.

4. **Язынин И.А.** Численное моделирование систем вывода пучка и локализации потерь с использованием изогнутых монокристаллов на УНК. Материалы Всесоюзного совещания. - Протвино, 1991, с.21-26.
5. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ. Физическое обоснование. Препринт ИФВЭ 93-27. - Протвино 1993, 230 с.
6. И.И. Дегтярев, А.Е. Лоховицкий, **И.А. Язынин**. Интегрированная версия комплекса программ ИФВЭ серии SCRAPER. Труды IV Российской конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-физических установок. Обнинск, 1994, т. 2, с. 25-27.
7. **I.A.Yazynin**. The impact parameter of the particles at the scraper and ways to increase it. EPAC, London, 27 June 1994, v.3, p.2432-2434.
8. **I.A.Yazynin**. BEAM EXTRACTION WITH USING OF VOLUME REFLECTION EFFECT IN CRYSTALS. PAC, 1995, v.3, p. 1952-1954.
9. И.И.Дегтярев, А.Е.Лоховицкий, М.А.Маслов, Ю.С.Федотов, **И.А.Язынин**. Расчет поглотителя аварийного сброса пучка прямого направления УНК-1. Труды XIV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т.2, с.245-249.
10. P.S. Vasilev, A.E. Kuznetsov, E.P. Kuznetsov, B.N. Lomonosov, V.A. Ryabov, V.A. Tsarev (Lebedev Inst.), V.I. Garkusha, S.S. Gershtein, G.G. Gurov, F.N. Novoskoltsev, Yu.M. Sapunov, A.A. Sokolov, Yu.S. Fedotov, Yu.S. Khodyrev, **I.A. Yazynin** (Serpukhov, IHEP) et al. EARCH FOR NEUTRINO OSCILLATIONS BY DETECTING UNK-1 600-GEV NEUTRINO BEAMS AT GRAN SASSO (ITALY). Published in Yad.Fiz.58, 1995, p.2210-2218.
11. **I.A.Yazynin**, I.I. Degtyarev, A.E. Lokhovitskii. Efficiency of the UNK scraper system. PAC, 1997, p.252-254.
12. **I.A.Yazynin**, I.I.Degtyarev, A.E.Lokhovitskii. Substance choice of the scraper system elements. PAC, 1997, p.255-257.
13. I.I. Degtyarev, O.A. Liashenko, I.A. Yazynin. Applications of Coupled SCRAPER-RTS&T Code in Radiation Therapy. PAC, 2001, p.2506-2508.
14. E. Merker, **I. Yazynin**, O. Napoly, R. Brinkmann, N. Walker, A. Drozhdin. Design of Beam and Beamstrahlung Extraction Lines for TESLA. EPAC. 2000, p.489-491.
15. R.Brinkmann, N.Walker, E.Merker, **I.Yazynin**. The Tesla High-Power Extraction Line. DESY. Tesla Report 2001-19, 7 pp.
16. R.Brinkmann, I.I.Degtyarev, A.E.Lokhovitskii, E.A.Merker, **I.A.Yazynin**. Beam Collimators. DESY. Tesla Report 2001-32, 8 pp.
17. Дрождин А.И., Федотов Ю.С., **Язынин И.А.** Быстрый резонансный вывод из УНК. Препринт ИФВЭ 87-176, Серпухов, 1987, -12 с.

18. M.D.Bavizhev, A.M.Taratin, S.A.Vorobiev, **I.A.Yazyinin**. Computer simulation of multiturn beam extraction from accelerators by bent crystals. Nucl. Instr. and Phys., B-58 (1991) 103-108.
19. **Язынин И.А.** Устройство для вывода пучка заряженных частиц. - Авторское свидетельство N 1829881. Приоритет изобретения 14.12.1989.
20. **Язынин И.А.**, Дегтярев И.И., Лоховицкий А.Е. Интегрированная система SCRAPER (Версия 1.0) для моделирования динамики движения пучка в циклическом ускорителе. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ N 950093, 15.05.1995.

Рукопись поступила 15 июня 2005 г.

И.А. Язынин.
Разработка и исследование систем локализации потерь, защиты и аварийного сброса пучка.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.
Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 17.06.2005. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 100. Заказ 62. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

АВТОРЕФЕРАТ, 2005 –24, ИФВЭ, 2005
