

Р-471

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 538.945:621.384.6

9-86-31

РЕШЕТНИКОВ
Геннадий Павлович

**СТАБИЛЬНОСТЬ ПОЛЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТА СИНХРОТРОНА
ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕПЛОВЫХ
И РАДИАЦИОННЫХ НАГРУЗКАХ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1986

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

Научные руководители:

доктор технических наук
профессор

ЗАЙЦЕВ

Лев Николаевич

доктор технических наук
старший научный сотрудник

ШЕЛАЕВ

Игорь Александрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

СМОЛЯНИН

Владимир Тимофеевич

МОХОВ

Николай Вениаминович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Московский радиотехнический институт, Москва.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1986 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

М.Ф. Лихачев

М.Ф. Лихачев

Общая характеристика работы

Актуальность задач, решаемых в диссертационной работе, обусловлена широким применением явления сверхпроводимости в ускорительной технике, в частности, развернувшимися в ведущих ускорительных центрах мира научными исследованиями и работами по созданию сверхпроводящих магнитных систем. Погружаемый в жидкий гелий дипольный магнит типа "оконная рама", с которым, в частности, проводились исследования в представленной работе, является элементом структуры создаваемого в ОИЯИ сверхпроводящего (СП) синхротрона СПИИ на энергию протонов 1,5 ТэВ и интенсивность $\sim 10^{11}$ протонов/цикл. В работе предложены чувствительные и эффективные методики измерения и расчёта значений поглощённой энергии, при которых происходит нарушения и стабильности основного показателя магнитной системы - ведущего поля, и устойчивости сверхпроводящего состояния магнита. Разработка указанных методик представляется актуальной не только в связи с созданием данного и других сверхпроводящих ускорителей, но и для проектирования электрофизических установок, содержащих сверхпроводящие магнитные системы (СМС), подвергаемые импульсным тепловым и радиационным нагрузкам.

Цель работы: экспериментально-расчётная проверка нового эффекта - радиационного возмущения ведущего поля сверхпроводящего синхротрона и определение предельно допустимой поглощённой энергии в обмотках его сверхпроводящих магнитов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Экспериментально обнаружен и изучен эффект радиационного возмущения распределения поля в апертуре СП дипольного магнита.
2. Впервые предложена методика измерения границы динамической устойчивости (ГДУ) СП магнита, новизна которой заключается в измерении предельно допустимой поглощённой энергии (ПДЭ) сверхпроводящей обмоткой (СПО) при синхронизации импульсного энерговыделения с циклом тока в СПО.
3. Получены новые экспериментальные данные о ГДУ СП магнита типа "оконная рама" и о распространении тепла и нормальной зоны в его обмотке.
4. Получены новые экспериментальные данные о токонесущей способности во внешнем магнитном поле до 5,5 Т СП кабеля, изготовленного из композитного сверхпроводника на основе NbTi сплава, при наличии в нём ограниченной нормальной зоны (ОНЗ).

5. Разработана методика определения предельно допустимой дозы (ПДД) для СИ магнитов синхротрона и на её основе рассчитаны ПДД для СИ диполя синхротрона СПИИ при падении протонов с энергией $0,5 \leq E_p \leq 10$ ГэВ и ядер гелия и углерода с энергиями $0,125 \leq E_{He} \leq 2,5$ ГэВ/нуклон и $0,125 \leq E_{12C} \leq 0,84$ ГэВ/нуклон на стенку ионопровода под острым углом.

6. Предложена методика определения поправки спектров заряженных частиц на потери из-за многократного кулоновского рассеяния в материале первых счётчиков времяпролётных спектрометров.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что впервые были получены следующие результаты:

1. Новый эффект – радиационное возмущение ведущего поля сверхпроводящего синхротрона, подтверждённый экспериментально при исследовании стабильности сверхпроводящего дипольного магнита, имеющий несомненно самостоятельную научную ценность, необходимо учитывать в практических расчётах предельно допустимых доз для сверхпроводящих магнитных систем с повышенными требованиями к однородности поля в рабочем объёме.

2. Разработана методика определения границы динамической устойчивости сверхпроводящего магнита, которая может быть применена при испытании магнитов других сверхпроводящих магнитных систем, работающих в условиях импульсного разогрева.

3. Полученные впервые экспериментальные данные, характеризующие температуру сверхпроводящей обмотки магнита при её импульсном нагреве, позволили определить погрешность и скорректировать методику расчётов тепловых процессов, происходящих при температурах, близких к 4,2 К.

4. Получены новые экспериментальные данные о скорости распространения нормальной зоны в плотной обмотке из транспонированного кабеля, которые необходимы при расчётах систем защиты и эвакуации запасённой энергии сверхпроводящего магнита при его переходе в нормальное состояние.

5. Получены новые экспериментальные данные о токонесущей способности транспонированного сверхпроводящего кабеля сечением 1×4 мм в полях с индукцией $0+5,5$ Т при наличии в нём искусственной нормальной зоны различных размеров.

6. Разработана методика определения предельно допустимой дозы в обмотке при облучении релятивистскими ядрами сверхпроводящих магнитов типа "оконная рама", которая может быть использована для сверхпроводящих магнитных систем ускорителей с аналогичными магни-

тами. Это подтверждает, в частности, сравнение рассчитанных значений предельно допустимых доз для данного магнита с экспериментальными результатами, полученными при облучении аналогичных магнитов на протонных пучках.

7. Предложена новая экспериментально-расчетная методика определения поправки регистрируемых спектров заряженных частиц на многократное рассеяние, использованная, в частности, в экспериментальных работах по измерению двойных дифференциальных сечений реакций с образованием дейтронов при взаимодействии протонов с энергией $380 \leq E_p \leq 665$ МэВ с ядрами Li, Be и C, которая может быть применена при измерении спектров заряженных частиц с помощью времяпролётных спектрометров.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Физические основы нового эффекта – радиационного возмущения магнитного поля в апertурах сверхпроводящих магнитов синхротрона.

2. Методические решения экспериментальной проверки эффекта, основанные на измерении гармонического состава поля при синхронизации подкритичного импульсного нагрева с циклом тока в сверхпроводящей обмотке магнита.

3. Методика измерения границы динамической устойчивости магнита в условиях импульсных тепловых и радиационных нагрузок на сверхпроводящие обмотки.

4. Результаты измерений неоднородности поля в апertуре дипольного магнита при импульсном подкритичном нагреве обмотки, температуры и динамической устойчивости её сверхпроводящего состояния, а также токонесущей способности специальных образцов кабеля обмотки.

5. Сравнительный анализ результатов измерений и модельных расчётов, выполненный с целью учёта радиационного возмущения магнитного поля при определении предельно допустимой поглощённой энергии в сверхпроводящих обмотках.

6. Методика определения, с учётом радиационного возмущения поля, предельно допустимой дозы облучения сверхпроводящих магнитов ядрами с энергией до 1,5 ГэВ/нуклон.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах в МИФИ, в отделе ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ, Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, криогенном отделе и отделах ускорителя ЛВЭ ОИЯИ, а также представлены в виде докладов на УШ Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 19–21 окт. 1982 г.), XII Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Лаборатория им. Э. Ферми, Батавия,

II-16 августа 1983 г.), УШ Международной конференции по магнитной технологии (Гренобль, 5-9 сент. 1983 г.) и достаточно полно отражены в 10 печатных работах, перечисленных в списке литературы.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и 2-х приложений. Материал работы, изложенный на 171 странице машинописного текста, включает 79 рисунков, 5 таблиц и список литературы, содержащий 160 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении отмечена актуальность задач обеспечения стабильности СМС синхротронов в условиях импульсных радиационных нагрузок, обусловленных потерями ускоряемых частиц. Обоснована необходимость изучения рассматриваемых вопросов, сформулирована цель работы, отмечена её научная новизна и практическая значимость, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе рассмотрены пространственно-временные характеристики энерговыделения в СМС синхротронов при потерях ускоряемых частиц; сделан литературный обзор экспериментально-расчётных работ по результатам импульсного нагрева образцов СП кабелей, модельных магнитов и соленоидов и облучения в различных условиях обмоток СП магнитов.

Анализ представленных в литературе данных по проблеме стабильности СП магнитов ускорителей в условиях импульсного радиационного воздействия позволяет сделать следующие выводы:

1. В создаваемых ускорителях на высокие энергии с СП магнитными элементами пространственно-временное распределение радиационных нагрузок, вызываемых потерями, будет аналогично наблюдаемому на "тёплых" установках, наиболее интенсивные нагрузки ожидаются в местах "возмущения" пучка.

2. К числу основных вопросов, подлежащих решению при обеспечении стабильности СМС синхротрона, относятся: а) получение распределения энерговыделения в СПО, вызываемого потерями, которые характеризуются неравномерностью по кольцу, достигающей 1+2 порядков, скользящей геометрией высадки на стенки ионопровода, разнообразной временной структурой с длительностью импульсов энерговыделения в диапазоне $10^{-6} \ll \tau_k \ll 10^0$ с, флуктуациями с перепадом радиационных нагрузок в несколько раз; б) определение предельно допустимых радиационных нагрузок в динамике рабочих параметров СМС, т.к. существующие расчётные и экспериментальные методики определяют ПДЭ при стационарном транспортном токе в СПО, основаны на характеристиках коротких образцов и экспериментально-расчётных данных, получаемых при непосредственном облучении.

3. Информации о интегральном распределении потерь по кольцу синхротрона достаточно для решения задачи о радиационной биологической защите персонала, однако для расчёта предельно допустимого энерговыделения в СМС необходимо знать пространственно-временную структуру, состав и спектрально-угловые характеристики потерь. Следовательно, получение распределения энерговыделения в СМС, обусловленного потерями, связано с решением двух основных задач: а) определения характеристик источника излучения; б) решения уравнения переноса излучения с учётом динамики вторичных частиц в камере синхротрона. В настоящее время задачи переноса излучения, рожденного протонами высокой энергии, и динамики частиц в камере синхротрона решаются на достаточно высоком уровне с помощью крупных вычислительных программ на ЭВМ; задача определения источника облучения СМС синхротрона до конца не решена.

4. Оценки показывают, что значительная доля частиц, падающих под малыми углами на стенки вакуумной камеры, рассеявшись, транспортируется по кольцу к новому месту высадки. Определение источника излучения невозможно без корректного учёта рассеяния этих частиц. Модифицированная теория G. Moliere^[14] хорошо описывает многократное рассеяние на всех элементах протонов и более легких заряженных частиц^[12] с энергией $E \ll 200$ ГэВ и ионов, от азота до урана^[13], с $E \ll 1,5$ МэВ/нуклон, однако в литературе отсутствует информация о сравнении экспериментальных данных с описанием с помощью этой теории многократного рассеяния быстрых ядер с энергией $E > 1,5$ МэВ/нуклон. Такая информация необходима для определения источника излучения в задаче расчёта энерговыделения от потерь в СМС синхротрона при ускорении ионов.

5. В литературе нет информации о взаимосвязи стабильности распределения поля в апертуре СП магнита и допустимого импульсного энерговыделения в его обмотке при постоянном и импульсном транспортном токе, характерном для работы СМС синхротрона, в то время как появление и развитие ОНЗ в СПО может вызвать изменение этого распределения.

6. Сравнение результатов измерений зависимости ПДЭ от длительности импульса энерговыделения, полученных с помощью импульсных нагревателей и при непосредственном облучении, показывает, что в первом случае адиабатические условия нагрева наступают при длительности импульса менее 10^{-3} с, а во втором - менее $2 \cdot 10^{-6}$ с. Вопрос о том, какова максимальная длительность импульса энерговыделения, для которого условия нагрева СПО магнита синхротрона можно считать адиабатическими, должен быть уточнён.

7. В литературе широко представлены расчётные и экспериментальные данные о пространственном распределении энерговыделения в

магнитных системах синхротронов для характерных при потерях случаев высадки протонов высоких энергий в камере ускорителя. Эти данные показывают, что при скользящей высадке протонов наблюдается перепад энерговыделения от внешних к внутренним слоям обмотки магнита. Для ионов с энергией в диапазоне $0,2 \leq E \leq 2,5$ ГэВ/нукл. такая информация, необходимая для определения наиболее "горячей точки" в СПО и расчёта ПДЭ в СП магните синхротрона СПИН, отсутствует.

На основании анализа данных, представленных в главе I диссертации, сформулированы основные задачи работы:

1. Исследовать характеристики содержащего НЗ кабеля СПО дипольного магнита синхротрона СПИН при индукции внешнего магнитного поля до 5 Т.
2. Разработать экспериментальную и расчётную методики определения ПДЭ в СПО магнита для проектных режимов тока СМС синхротрона СПИН.
3. Провести детальное сравнение результатов измерений и расчётов с целью установления применимости расчётной методики и достоверности получаемой расчётной информации.

4. Исследовать стабильность распределения поля в апертуре дипольного магнита синхротрона СПИН при импульсном подкритичном энерговыделении в СПО.

5. На основании известных экспериментальных данных и теоретических работ по многократному рассеянию заряженных частиц получить и экспериментально проверить выражение для учёта многократного рассеяния быстрых ядер на поверхностях в вакуумной камере синхротрона.

6. Рассчитать распределение энерговыделения в магните синхротрона СПИН при скользящей высадке протонов и легких ядер на стенки ионопровода для диапазонов энергий $0,5 \leq E_p \leq 10$ ГэВ; $0,125 \leq E_{\text{чHe}} \leq 2,5$ ГэВ/нуклон; $0,125 \leq E_{12\text{C}} \leq 0,85$ ГэВ/нуклон.

7. На основании данных о распределении энерговыделения при высадке протонов высоких энергий и ПДЭ в СПО магнита синхротрона СПИН при импульсном нагреве исследовать зависимость ПДЭ от подкритичности магнита и длительности импульса энерговыделения.

Во второй главе приводятся описания измерений предельных токов СП кабеля при наличии в нём НЗ, методики определения ГДУ и исследований на её основе стабильности поля в апертуре, распространения тепла и развития НЗ при импульсном нагреве СПО дипольного магнита синхротрона СПИН.

С целью оценки влияния размеров НЗ, которая может возникнуть от внешних источников энерговыделения, на токонесущую способность СП кабеля, используемого в дипольном магните синхротрона СПИН, были выполнены измерения I_c предельных токов \tilde{I}_c коротких (≈ 10 см)

образцов этого кабеля, содержащих искусственно созданные НЗ, во внешнем поперечном магнитном поле с индукцией $0,5 \leq B \leq 5,3$ Т.

Из плоского (сечением 1×4 мм²) транспонированного (шаг 22 мм) СП кабеля, содержащего 15 композитных проводников ПНТ - 0,5 - IO45, каждый из которых состоит из IO45 Nb-50% Ti нитей диаметром ~ 10 мкм в медной матрице (коэффициент заполнения 0,47), были изготовлены образцы, содержащие тщательно впаянные медные вставки, замещающие участки СП проводников (рис. I). Коэффициент упаковки проводников в кабеле 0,93.

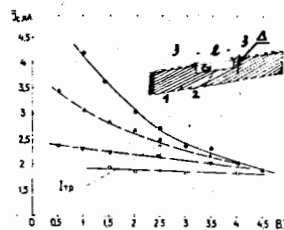


Рис. I. Общий вид исследованных образцов СП кабеля: I - СП кабель; 2 - медная вставка; 3 - припой. Размеры ℓ и Δ указаны в таблице I. Ниже показаны зависимости предельного тока \tilde{I}_c от внешнего магнитного поля для образцов СП кабеля №№ I - \bullet , 2 - Δ , 3 - ∇ и 4 - \circ .

Геометрические характеристики исследованных образцов приведены в таблице I.

Таблица I

Образцы СП кабеля №№ пп	Размеры медной вставки		Число ненарушенных СП проводников в кабеле
	ℓ , мм	Δ , мм	
I	0	0	15
2	II	0,5	6
3	II	1,0	4
4	II	1,5	2

Вольт-амперные характеристики исследуемых образцов измерялись методом низкоомного шунта. Полученные зависимости предельного тока от индукции внешнего магнитного поля для образцов, указанных в табл. I, показаны на рис. I.

Для образца № I и других аналогичных образцов СП кабеля (без вставок) зависимость $\tilde{I}_c(B)$ является зависимостью критического тока короткого образца СП кабеля от индукции внешнего магнитного поля $I_c(B)$; для образцов № 2, № 3 и № 4 зависимость $\tilde{I}_c(B)$ интерпретируется как зависимость минимального тока распространения нормальной зоны I_p в ненарушенном СП кабеле от индукции внешнего магнитного поля. В том случае, если НЗ занимает все сверхпроводники в кабеле, в условиях интенсивного теплообмена, предельный ток \tilde{I}_c соответствует I_c^*

максимальному току равновесия нормальной зоны. Практически при соответствующих условиях теплообмена уменьшение \bar{J}_c с ростом Δ , до определенных пределов, может не сказаться на величине транспортного тока ($\bar{I}_{тр}$) в СП магните, как, например, для образца № 2 и зависимости $I_{тр}$, показанной на рис.1 пунктирной линией.

Результаты измерений $I_c(B)$ для ненарушенных образцов (№ 1) СП кабеля описываются зависимостью (сплошная линия на рис.1)

$$\left[I_c (B + 1,74) \right]^{1/2} = 0,655 (T_c - T_0), \quad (1)$$

где $T_c = 9,4$ К и $T_0 = 4,2$ К, позволяющей оценить температурный (ΔT_p) и энтальпийный $[\Delta E(\Delta T_p)]$ резерв обмотки при номинальном значении транспортного тока $I_{тр}^{ном} = 2,07$ кА магнита:

$$\Delta T_p = T_c - 1,52 \left[I_{тр}^{ном} (1,05 \bar{I}_{тр}^{ном} + 1,74) \right]^{1/2} - T_0 = (0,8 \pm 0,1) \text{ К}, \quad (2)$$

$$\Delta E(\Delta T_p) = \int_{T_0}^{T_c} C(T) dT \approx (0,3 \pm 0,05) \text{ Дж} \cdot \text{кГ}^{-1}, \quad (3)$$

где T_c^H и $C(T)$ - критическая температура при номинальном токе и теплоемкость композитного проводника.

Исследования устойчивости дипольного СП магнита синхротрона СПИИ к импульсному нагреву, стабильности распределения поля в апертуре, закономерностей распространения тепла и НЗ в СПО проводились с помощью импульсных нагревателей^[3-8]. Расположение в магните нагревателей Н1, Н2, Н3, Н4 и термометров АБ1, АБ2, АБ3, АБ4, ТВО, контактирующих с СПО, а также индукционного датчика для измерения пространственного распределения поля в апертуре показано на рис.2 и 3.

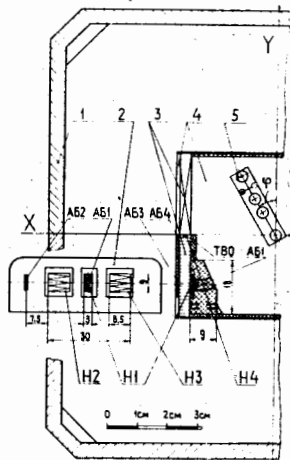


Рис. 2. Расположение нагревателей, термометров и индукционного датчика в магните: 1 - железный бандаж ярма; 2 - стеклотекстолитовая плата (размеры в мм) с нагревателями Н1, Н2 и Н3 и термометрами АБ1 и АБ2 (показан вид в плоскости, контактирующей с обмоткой), 3 - сверхпроводящая обмотка; 4 - пространство в магните, заполненное жидким гелием; 5 - индукционный датчик магнитного поля.

Экспериментальный магнит с размещенным в нём индукционным датчиком магнитного поля находился в заполненном находящимся в состоянии насыщения при $T_0 = 4,2$ К жидким гелием криостате и запитывался импульсами тока, имеющими треугольную форму. Сигналы

с датчика, поворачивающегося в паузах между импульсами тока на угол $\Delta \varphi = 90^\circ$, при отслеживании уровней тока с шагом $0,1 \cdot I_{max}$ интегрировались, усиливались, кодировались с помощью аналого-цифрового преобразователя и обрабатывались на ЭВМ. Нагреватели (по выбору) запитывались электрическими импульсами длительностью $\tau_u = 0,5$ мс с регулируемой задержкой относительно импульса тока в СПО. Энергия контро-

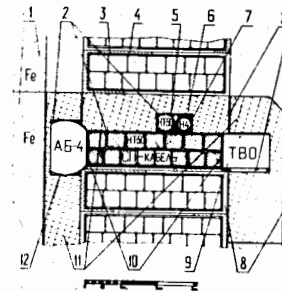
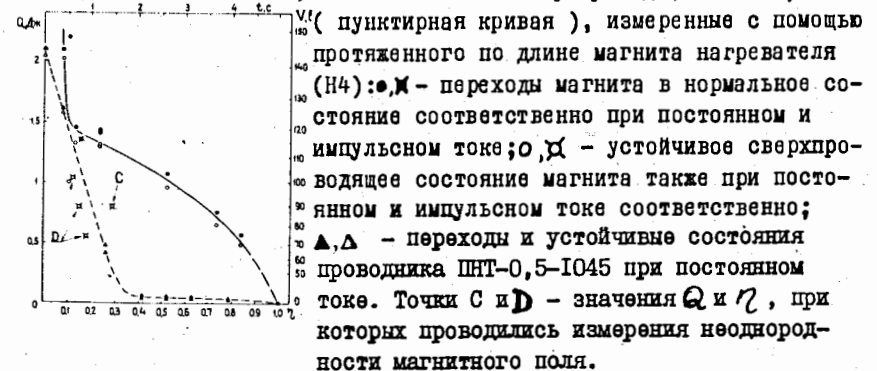


Рис.3. Расположение в обмотке магнита нагревателя Н4, термометров АБ4 и ТВО и отдельного композитного сверхпроводника $\phi 0,5$ мм ПНТ-0,5-I045 (НТ-50): 1- ярмо магнита; 2- эпоксидный клей; 3-стеклолента; 4-лавсановая лента, толщиной 2×10 мкм; 5- отдельный композитный СП проводник ПНТ-05 -I045; 6-протяженный (вдоль всей обмотки) нагреватель Н4; 7 - шелковая оплётка нагревателя, пропитанная эпоксидным клеем; 8-пространство, заполненное жидким гелием; 9 -термометр ТВО; 10-клей БФ-4; 11-стеклотекстолит; 12 - термометр АБ4.

лировалась и изменялась от импульса к импульсу. Когда энергия в импульсе превосходила предельно допустимую (Q_p), датчик перехода всей СПО магнита в нормальное состояние запускал систему аварийного отключения. Синхронно проводились записи показаний термометров и напряжений на потенциальных выводах с витков СПО. Измерения проводились как при импульсном, так и при постоянном токе в СПО. Композитный сверхпроводник ПНТ-0,5-I045 (НТ-50) подключался к отдельному источнику тока и находился при той же подкритичности $\eta = I / I_{max}$, что и каждый СП проводник кабеля обмотки магнита.

Рис. 4. Границы устойчивости СП магнита синхротрона СПИИ (сплошная линия) и композитного сверхпроводника ПНТ-0,5-I024



(пунктирная кривая), измеренные с помощью протяженного по длине магнита нагревателя (Н4): \bullet, \times - переходы магнита в нормальное состояние соответственно при постоянном и импульсном токе; \circ, \times - устойчивое сверхпроводящее состояние магнита также при постоянном и импульсном токе соответственно; $\blacktriangle, \blacktriangle$ - переходы и устойчивые состояния проводника ПНТ-0,5-I045 при постоянном токе. Точки С и D - значения Q и η , при которых проводились измерения неоднородности магнитного поля.

Результаты измерений границ устойчивости СП магнита и композитного проводника, полученные с помощью нагревателя Н4, показаны на рис.4.

Гармонический анализ сигналов датчика магнитного поля позволяет представить поле в апертуре в виде

$$\frac{1}{\ell_{эфф}} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} B_y dz = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_a}\right)^{n-1} \cdot b_n \cos(n\varphi + \varphi_n), \quad (4)$$

$$\frac{1}{\ell_{эфф}} \int_{-\ell/2}^{\ell/2} B_r dz = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R_a}\right)^{n-1} \cdot b_n \sin(n\varphi + \varphi_n), \quad (5)$$

где $\ell_{эфф}$ - эффективная длина магнита ($\ell_{эфф} = 43$ см); B_r - радиальная составляющая магнитного поля; B_φ - азимутальная составляющая магнитного поля; r, φ, z - цилиндрические координаты (ось z совмещена с осью магнита); R_a - радиус полезной апертуры магнита; b_n и φ_n - коэффициенты, характеризующие мультипольные составляющие магнитного поля; зависимости от тока магнита гармонических коэффициентов b_2 и b_4 , как "возмущенных" импульсным нагревом, так и "невозмущенных", полученные с помощью локального (Н1) и протяженного нагревателя (Н4), показаны на рис. 5а и 5б соответственно.

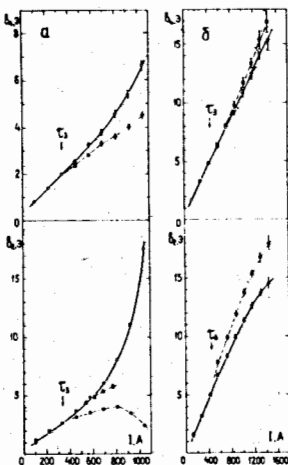


Рис. 5. Зависимости гармонических коэффициентов b_2 и b_4 от тока магнита при работающих (пунктирные кривые) и выключенных (сплошные линии) нагревателях: а - измерения с локальным нагревателем Н1; б - измерения с протяженным нагревателем Н4 (условия нагрева СПО соответствуют точке "с" на рис.4).

Если задержка включения нагревателя Н4 и энергия его теплового импульса выбирались соответствующими точкам Д на рис.4, то есть ниже границы устойчивости отдельного композитного сверхпроводника ПНТ-0,5-1045, находящегося по отношению к нагревателю Н4 в таких же тепловых условиях, что и проводники кабеля СПО магнита, то поведение гармонических коэффициентов $b_n(i)$ от включения нагревателя не зависело. Вертикальные стрелки на рис.5 показывают момент включения импульсного нагревателя.

Относительные изменения вертикальной $B_y(x, y, z)$ и горизонтальной $B_x(x, y, z)$ составляющих магнитного поля в медианной плоскости

магнита могут быть представлены в виде

$$\frac{\Delta B_y}{B} = \frac{\int_{-\ell/2}^{\ell/2} B_y(x, 0, z) dz - \int_{-\ell/2}^{\ell/2} B_y(0, 0, z) dz}{\int_{-\ell/2}^{\ell/2} B(0, 0, z) dz} \quad (6)$$

$$\text{и} \quad \frac{\Delta B_x}{B} = \frac{\int_{-\ell/2}^{\ell/2} B_x(x, 0, z) dz}{\int_{-\ell/2}^{\ell/2} B(0, 0, z) dz}, \quad (7)$$

где x, y и z - декартовы координаты (см. рис.2).

Радиальные распределения величин $\frac{\Delta B_x}{B}(x)$ и $\frac{\Delta B_y}{B}(x)$ в апертуре магнита, измеренные при работающем и отключенном протяженном нагревателе Н4, показаны на рис. 6. Результаты приведены для момента, когда значение индукции поля в центре апертуры $B_0 = 1,34$ Т/8/.

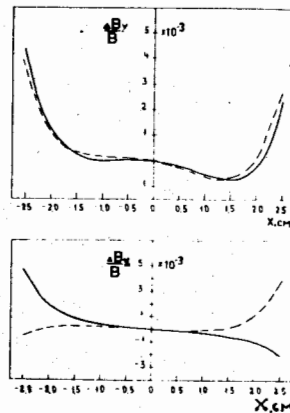


Рис.6. Радиальные распределения величин $\frac{\Delta B_y}{B}(x)$ и $\frac{\Delta B_x}{B}(x)$

в апертуре СП диполя при включенном (пунктирные кривые) и выключенном (сплошные линии) нагреве СПО с помощью протяженного нагревателя. Данные приведены для момента, когда линейно нарастающая индукция в центре апертуры $B_0 = 1,34$ Т.

Относительная погрешность измерений $\delta \frac{\Delta B}{B} \leq 10^{-4}$.

Полученные результаты свидетельствуют о заметном относительном изменении нелинейностей под действием локального нагрева СПО, не переводящего сверхпроводящий магнит в нормальное состояние. Таким

образом, впервые экспериментально наблюдалось изменение неоднородности линейно нарастающего поля в апертуре дипольного магнита при образовании ограниченной нормальной зоны под действием локального подкритичного нагрева обмотки внешним импульсным источником тепла /3/.

В кабеле СП магнитов, поля которых формируются в основном СПО, образование ОНЗ может привести к большему изменению гармонического состава поля ($\frac{\Delta B}{B}$), что следует учитывать при разработке магнитных систем ускорителя, работающих в условиях повышенной радиационной нагрузки /4/.

В третьей главе проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами теплофизических расчетов и расчетов изменения гармонического состава поля в апертуре СП диполя; качественно проанализирована связь роста НЗ в СПО с искажениями поля в апертуре дипольного магнита синхротрона и потерями пучка при ускорении /4/.

Расчёт разогрева обмотки применительно к условиям данного эксперимента¹⁷⁾ проводился с использованием метода, основанного на численном моделировании задачи набором одномерных нестационарных уравнений теплопроводности:

$$(A\gamma C_V)_{i,j} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(A\lambda)_{i,j} \frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + (Aq)_{i,j} + \sum_{j=1}^{M_y} \left(\frac{\rho}{R_T} \right)_{ij} (T_j - T_i) + (hp)_{i,j} (T_0 - T_i), \quad (8)$$

для слоёв, на которые разбивалась расчётная область, с начальными граничными условиями:

$$T_i(x,0) = T_{0i}, \quad (9)$$

$$A_i T_i + B_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = C_i \quad \text{при } X = 0, \quad (10)$$

$$D_i T_i + E_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = F_i \quad \text{при } X = L_X, \quad (11)$$

где T - температура; A - площадь поперечного сечения; γ - плотность; C_V - удельная теплоёмкость; t - время; λ - коэффициент теплопроводности; q - мощность тепловыделения на единицу объёма; M_y - число уравнений; ρ - периметр теплового взаимодействия; R_T - термическое сопротивление; h - коэффициент теплоотдачи; L_X - характерный размер.

Индекс i означает номер уравнения, T_{0i} - начальное значение температуры. Для того чтобы учесть изменение свойств материалов в зависимости от температуры и величины индукций магнитного поля, комплексы $(A\gamma C_V)_i$, $(A\lambda)_i$ и $(\rho/R_T)_i$ были функциями x и T ; $(Aq)_i$ и $(hp)_i$ - функциями x , T и t ; A_i , B_i , C_i , D_i , E_i , F_i - функциями T и t .

Введение в уравнения членов, описывающих тепловое взаимодействие с хладогентом и связи между уравнениями, использование обобщенных граничных условий (10), (11) позволяют применять систему (8) + (11) для моделирования подобного рода (двумерных и трехмерных нестационарных) задач.

Рис.7 иллюстрирует экспериментальную и расчётную зависимости допустимого тепловыделения в нагревателе Aq от подкритичности, где $I_c \approx 2$ кА - критический ток обмотки в собственном магнитном поле при $T_0 = 4,2$ К и $\alpha = 0$. Эти данные были измерены путем варьирования α при $\bar{I} = const$. Сплошной линией показаны результаты расчёта. В расчётах предполагалось, что переход обмотки с транспортным током $\bar{I} = \bar{I}_c(T_{max}, V_0)$ в нормальное состояние происходит при выполнении условия $T(t) \gg T_{max}$. Для определения величины критического тока $\bar{I}_c(T, V_0)$ использовалась характеристика образца (I), полученная в экспериментах по определению токонесущей способности СП кабеля

(гл. II) и скорректированная с учётом значения критического тока обмотки экспериментального магнита при $T = 4,2$ К.

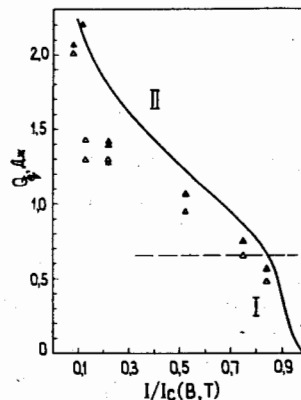


Рис.7. Рассчитанная (сплошная линия) и измеренная в эксперименте (светлые треугольники - сверхпроводящее состояние магнита при импульсном нагреве СПО, тёмные - переходы магнита) зависимости предельно допустимого импульсного ($T_u \approx 0,5$ мс) энерговыведения в нагревателе Н4 от подкритичности СП магнита.

Цифрой I отмечена расчётная область, в которой переход обмотки происходил в режимах нестационарного пузырькового и плёночного кипения, цифрой II - в режиме перегрева пара гелия.

Полученные (гл. II) экспериментальные данные по импульсному нагреву обмотки позволили проверить и скорректировать тепловые расчёты для штатного СП диполя погружного типа, используемого в СМС синхротрона СФИН.

Удовлетворительное совпадение результатов расчёта с экспериментальными данными позволило рассчитать предельно допустимые энерговыведения в магните синхротрона СФИН для случая, когда источник описывался эмпирической функцией, полученной на основе данных о радиальном распределении плотности энерговыведения при падении на СПО протонов с энергией $E_p \ll 10$ ГэВ (формирование источника энерговыведения при падении ускоренных частиц на стенки вакуумной камеры синхротрона СФИН рассмотрено в гл. IV).

Распределение плотности энерговыведения $q_v(x, y)$ предполагалось равномерным по длине магнита и нормальным (с параметром σ_y) по координате Y (см. рис.2):

$$q_v = k E_p L_p \exp \left\{ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \gamma_p(E_p) \left[\left(1 + \frac{4y^2}{a^2} \right) \left(x - \frac{a}{2} \right) \right]^{1/2} \right\}, \quad (12)$$

где $k = 1,2 \cdot 10^{-6}$; E_p - энергия вторичных протонов; L_p - число потерянных протонов; $\gamma_p(E_p) = 3,1 \ln E_p + 4,1$; a - размер апертуры магнита.

С использованием этого распределения были рассчитаны¹⁷⁾ зависимости (рис.8) величины энергии, необходимой для перехода в нормальное состояние точки обмотки с координатами $x = a/2$, $y = 0$ и обмотки в целом (нормальная зона занимает все сечение кабеля), от

длительности импульса энерговыделения τ_u при различных значениях подкритичности.

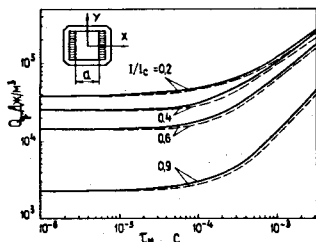


Рис. 8. Зависимость от длительности импульса предельно допустимого энерговыделения для точки обмотки с координатами $x = a/2, y = 0$ (сплошные линии) и обмотки в целом (пунктирные кривые) при падении протонов с энергией $E_p = 1$ ГэВ на обмотку магнита.

Результаты расчёта приведены для значения энергии первичных протонов 1 ГэВ и плотности вещества $\gamma = 0,72$ г/см³ в СП кабеле обмотки. Перепад температуры по обмотке вдоль оси X в момент времени $t = 5 \cdot 10^{-4}$ с составляет 1,5 К.

На рисунке 9 представлены результаты расчёта предельно допустимой дозы (ПДД) W_q в СПО диполя для случая энерговыделения в обмотке согласно (12) при $E_p = 1$ ГэВ и длительности импульса энерговыделения $5 \cdot 10^{-4}$ с и $2 \cdot 10^{-5}$ с.

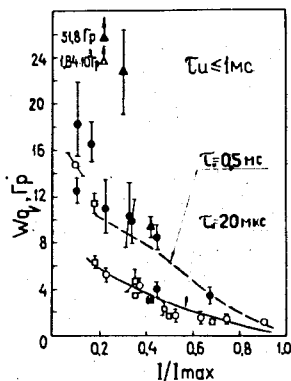


Рис. 9. Экспериментальные данные, полученные при облучении СП магнитов на протонных пучках в различных условиях, и наши расчёты ПДД (сплошная и пунктирная линии) для облучения СПО диполя синхротрона СПИН протонами с энергией $E_p = 1$ ГэВ.

Здесь же представлены экспериментальные данные, полученные при облучении в различной геометрии СП магнитов протонными пучками с энергиями $27,6 \leq E_p \leq 400$ ГэВ в Лаборатории им. Э.Ферми, Арагонской и Брукхейвенской лабораториях (США)¹⁵⁻¹⁷. Сравнение данных, полученных в экспериментах по облучению СП магнитов, и результатов расчёта показывает их удовлетворительное, на наш взгляд, согласие, а данная методика расчёта рекомендуется для прогнозирования ПДД в СПО магнитных систем ускорителей высоких энергий^{17,5/}.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с расчётом радиационных нагрузок на СПО магнитов синхротрона: анализируется применимость теории многократного рассеяния G.Moliere^{11/} к задаче определения источника радиационного нагрева СМС и приведены результаты расчёта распределения доз в СП магните синхротрона СПИН при скользящем падении протонов и ядер ⁴He и ¹²C на стенку ионопровода.

Данные об источнике энерговыделения могут быть получены только при корректном учёте рассеяния теряемых частиц в вакуумной камере синхротрона.

Модифицированная теория G.Moliere хорошо описывает многократное рассеяние на всех элементах протонов и более лёгких заряженных частиц с энергиями до 200 ГэВ и ионов от азота до урана с энергиями до 1,5 МэВ·нуклон^{-1/12,13/}.

В процессе разработки новой методики поправки измеряемых с помощью времяпролетного спектрометра спектров заряженных частиц на потери из-за многократного кулоновского рассеяния^{10/} была проведена экспериментальная проверка корректности описания этой теории многократного рассеяния на спинтиллляторе (¹⁹C, ²¹N), меди и свинце ядер ²H, ³H, ³He и ⁴He с импульсами 0,8+2 ГэВ/с^{9,10/}. Результаты показали согласие экспериментальных и расчётных данных в пределах экспериментальных ошибок.

Расчёты, выполненные путём пошагового розыгрыша угла рассеяния, вычисляемого на основе этой теории, и с учётом поперечного смещения траектории частиц в материале, показывают, например, что при падении лёгких ядер (P, He, C) с энергией до 1 ГэВ/нуклон под углом 1 миллирадиан на стальную стенку вакуумной камеры более 50% их числа отражается. Поэтому при расчётах радиальных дозных распределений и оценках допустимых потерь пучков в синхротроне СПИН учитывалось отражение теряемых частиц от стенок ионопровода.

При проведении расчётов нами использован вариант комплекса программ, разработанного на основе каскадно-испарительной модели ядроядерных взаимодействий. На рис.10 показан, например, результат расчёта радиального распределения дозы $D(x-a/2, y)$ в материале дипольного магнита синхротрона СПИН при падении ядер углерода с энергией $0,125 \leq E_{nC} \leq 0,84$ ГэВ под углом $\alpha_E = 1$ мрад на стенку ионопровода. Штриховкой на рис.10 отмечены области, соответствующие стенке ионопровода толщиной 0,5 мм, сверхпроводящей обмотке и железному ядру магнита. С использованием вышеуказанного комплекса программ^{18/}, адаптированного к данной задаче, были получены аналогичные результаты для ядер легче углерода с энергиями $E \leq 1$ ГэВ·нукл.¹

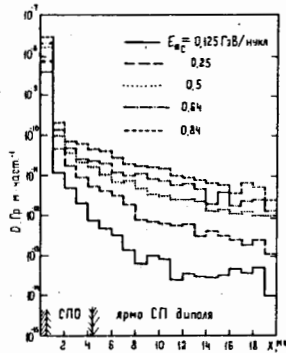


Рис.10. Распределение поглощённой дозы по глубине дипольного СП магнита при падении на стенку ионопровода синхротрона под углом θ мрад ядер углерода.

На основе полученных расчётных данных разработана методика^{1/2/} полуэмпирической оценки дозы в СП магнитах и допустимой интенсивности пучков при настройке сверхпроводящих синхротронов. Результаты расчёта предельно допустимой интенсивности пучков (N_g) протонов и ядер при равномерно распределённых потерях по периметру (ℓ_y) синхротрона СПИН представлены в таблице 2 (звёздочкой отмечена принятая толщина стенки ионопровода ускорителя).

Таблица 2

Тип ядра	Проектные данные синхротрона СПИН		N_g , частиц·цикл ⁻¹ , $\eta = 0,8$; $\ell_y = 54$ м, $\alpha E = 1$ мрад толщина стенки ионопровода, мм		
	E ГэВ·нукл. ⁻¹	N_0 ядер·цикл ⁻¹	0,0	0,5*	1,0
¹ H	1,5	$1,4 \cdot 10^{11}$	$6,6 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{12}$
² H	0,53	$2,8 \cdot 10^{11}$	$3,5 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^{12}$
⁴ He	0,53	$1,4 \cdot 10^{11}$	$1,9 \cdot 10^{10}$	$9,2 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{12}$
¹² C	0,53	$1,2 \cdot 10^{11}$	$3,4 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^{11}$
⁵⁶ Fe	0,39	$1,55 \cdot 10^{10}$	$5,9 \cdot 10^8$	$7,7 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{11}$
¹³¹ Xe	0,23	$4,47 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^8$	$6,2 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{11}$
²⁰⁷ Pb	0,145	$2,4 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^8$	$7,8 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^{11}$

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Установлена взаимообусловленная термодинамическая и электромагнитная связь потерь частиц при ускорении и радиационного нагрева обмоток с изменением распределения поля в апертурах сверхпроводящих магнитов синхротронов.

2. Предложено методическое решение экспериментальной проверки указанного эффекта, основанное на измерении гармонического состава поля при синхронизации подкритичного импульсного нагрева с циклом тока в сверхпроводящей обмотке и разделении во времени электромагнитного и теплового возмущения распределения поля магнита. Экспериментально и с помощью расчётов проверена применимость этого решения к магнитам с обмотками из транспонированного кабеля.

3. Разработана методика, позволяющая измерять распределение магнитного поля в апертуре и границу динамической устойчивости сверхпроводящего магнита при импульсном нагреве его обмотки.

4. Впервые получены следующие экспериментальные результаты:

а) токнесущая способность транспонированного кабеля с искусственно созданной нормальной зоной достаточна при индукции до 1,5 Т для импульсного режима работы магнита синхротрона СПИН;

б) границы динамической устойчивости сверхпроводящего кабеля и отдельного композитного сверхпроводника различаются в диапазоне индукций 0,3-2 Т; в пределах этой области в кабеле сверхпроводящей обмотки может существовать нормальная зона, что подтверждается изменением гармонического состава поля магнита;

в) показания термодатчиков, контактирующих со сверхпроводящей обмоткой, свидетельствуют о наличии температурного градиента, приводящего к переходу отдельных проводников при сохранении токнесущей способности кабеля в целом.

5. Целенаправленно использован комплекс разработанных программ для расчёта распространения тепла, который позволил впервые:

а) рассчитать усреднённую температуру термометров, контактирующих со сверхпроводящей обмоткой, и отдельных элементов кабеля;

б) провести сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчётных данных с целью коррекции расчётов;

в) получить пространственно-временное распределение температуры в сечении обмотки при её импульсном нагреве и облучении;

г) установить предельно допустимые дозы облучения сверхпроводящего дипольного магнита синхротрона СПИН.

6. Сделан анализ методов расчётов поглощённой энергии в слоях обмотки толщиной до 4 г/см^2 при скользящем падении релятивистских ядер с энергией до $1,5 \text{ ГэВ/нуклон}$ и получены:

а) коэффициенты отражения частиц в результате многократного кулоновского рассеяния на стенках стальной вакуумной камеры синхротрона;

б) полуэмпирические выражения для вычисления поглощённой энергии при равномерно распределённом линейном источнике потерь первичных ядер;

в) предельно допустимые величины потерь в обмотке дипольного магнита сверхпроводящего синхротрона СИН с учётом эффекта радиационного возмущения магнитного поля.

Материалы, в которых отражены основные положения диссертации:

1. Зайцев С.Л., Петрова Л.В., Решетников Г.П., Юдин И.П. Влияние ограниченной нормальной зоны на предельный ток сверхпроводящего кабеля и распределение поля в апертуре дипольного магнита. Сообщение ОИЯИ, Р9-84-547, Дубна, 1984.
2. Зайцев Л.Н., Решетников Г.П., Сырейщиков А.Е. Оценки допустимых интенсивностей пучков при настройке сверхпроводящих ускорителей релятивистских ядер. Сообщение ОИЯИ, 9-86 - 4, Дубна, 1986.
3. Василёв П.Г., Решетников Г.П. и др. Измерение неоднородности поля в условиях импульсного нагрева обмотки сверхпроводящего магнита. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-394, Дубна, 1983.
4. Василёв П.Г., Решетников Г.П. и др. Влияние потерь энергии пучка на динамику частиц в сверхпроводящих синхротронах. Препринт ОИЯИ, Р9-82-486, Дубна, 1982. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 19-21 октября 1982 г. ОИЯИ, Дубна, 1983, т. I, с. 281-285.
5. Василёв П.Г., Решетников Г.П. и др. Тепловые процессы и устойчивость сверхпроводящего состояния дипольного магнита при импульсном нагреве обмотки. И Ф Ж, 1985, т. 48, № 2, с. 301-305.
6. Василёв П.Г., Решетников Г.П. и др. Тепловые процессы и устойчивость сверхпроводящего диполя при импульсном нагреве обмотки. Особенности распространения нормальной зоны. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-777, Дубна, 1983.
7. Василёв П.Г., Решетников Г.П. и др. Тепловые процессы и устойчивость сверхпроводящего диполя при импульсном нагреве обмотки. Сравнение динамических тепловых характеристик с расчётными. Препринт ОИЯИ, Р9-83-787, Дубна, 1983.

8. Vassilev P.G., ..., Reshetnikov G.P. et al. Field Nonhomogeneity Measurements at Pulsed Heating of the Superconducting Magnet Winding. Proceedings of the 12th Int. Conf. on High-Energy Accel. Fermilab, August 11-16, 1983, p.552-553. Journal de Phys., 1984, Coll. C1, Suppl. n°1, t.45, p.845-848.

9. Комаров В.И., Косарев Г.Е., Решетников Г.П. и др. Спектры быстрых ядер гелия-3, трития и гелия-4, образующихся при взаимодействии протонов с энергией 665 МэВ с лёгкими ядрами. Сообщение ОИЯИ, Р1-7784, Дубна, 1974.

10. Мотц Г., Решетников Г.П. Поправка спектров заряженных частиц на потери из-за многократного кулоновского рассеяния в регистрирующей аппаратуре. Сообщение ОИЯИ, Р13-9167, Дубна, 1975.

Цитированные работы

11. Von Gert Moliere. Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen. Z. Naturforsch., 1947, B.2a, s.113-150; Z. Naturforsch., 1948, B.3a, s.78-97.
12. Shen G. et al. Measurement of Multiple Scattering at 50 to 200 GeV/c. Phys.Rev., 1979, v.20, p.1584-1588.
13. Belery P., Delbar T. and Gregoire G. Multiple Scattering and Energy Straggling of Heavy Ions in Solid Targets. Nucl. Instr. Meth., 1981, v.179, No1, p.1-9.
14. Simon W.G. Verification of Moliere's Theory of Multiple Scattering for Heavy Ions. Phys.Rev., 1964, v.36, No.213, p.410-415.
15. Bozoki G. et. al. Final Report of the Radiation Heating Task Force. Rep. BNL 51387, 1981, p. 1-11.
16. Cox B., Mazur P.O. and Van Ginneken A. Sensitivity of an Energy Doubler Dipole to Beam Induced Quenches. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, No. 3, p. 3885-3887.
17. Dixon R., Mokhov N.V. and Van Ginneken A. Beam Induced Quench Study of Tevatron Dipoles. Rep. Fermilab, FN-327, 1980.
18. Барашенков В.С. и др. Программный комплекс "Каскад" для Monte-Carlo моделирования ядерно-физических процессов, инициируемых высокоэнергетическими частицами и ядрами в газообразных и конденсированных средах. Препринт ОИЯИ, Р2-85-173, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 января 1986 года.