

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.1.074.

М-906

16-86-840

МУНТЯН

Сергей Васильевич

**КРИОГЕННЫЕ ДОЗИМЕТРЫ
ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1987

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

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

Лев Николаевич
ЗАЙЦЕВ

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Юрий Иосифович
БРЕГАДЗЕ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Владимир Дмитриевич
ПЕШЕХОНОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики высоких энергий, Протвино

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1987 года
в _____ час. на заседании Специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московская обл., конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1987 года

Учёный секретарь
специализированного совета

М.Ф.ЛИХАЧЕВ

Актуальность проблемы. В настоящее время разрабатываются и вводятся в строй ядерно-физические установки, высокая эффективность которых обусловлена использованием современных достижений в области криогенной техники. При облучении сверхпроводящих магнитных структур высокоэнергетических ускорителей дозы в обмотках магнитов могут превысить допустимые значения, привести к переходу их в нормальное состояние. Для контроля за импульсными радиационными нагрузками необходима система регистрации доз в сверхпроводящих обмотках (СПО) магнитов, основанная на криогенных дозиметрах, малочувствительных к переменным магнитным полям вплоть до 5 Тл и имеющих небольшие размеры. Существующие типы дозиметров не обладают указанными свойствами, поэтому создание дозиметра, предназначенного для определения дозы в СПО от импульсного высокоэнергетического излучения в условиях криогенных температур и сильных магнитных полей, является актуальным.

Цель работы – разработка методики определения дозы в СПО магнитов ускорителей и создание на её основе криогенных дозиметров смешанных полей высокоэнергетического импульсного излучения.

Научная новизна – на основании разработанной методики измерения дозы в материалах, близких по составу к техническому сверхпроводящему кабелю, впервые создан и исследован квазиadiaбатический calorиметрический дозиметр импульсного высокоэнергетического излучения, состоящий из медного поглотителя, специального высокочувствительного угольного термометра сопротивления, имеющего тепловой и электрический контакт с поглотителем, и теплоизолирующей оболочки. Данный дозиметр обладает, по сравнению с известными calorиметрами, малыми линейными размерами (порядка нескольких миллиметров), более высокой чувствительностью и пригоден к эксплуатации в условиях криогенных температур и сильных магнитных полей.

Проведено исследование предложенных нами calorиметрических дозиметров на основе терморезисторов ТВО⁽¹⁾, Аллен-Бредли⁽²⁾ и терморезистора, изготовленного из медноникелевого сплава, в полях высокоэнергетического излучения.

С помощью разработанных дозиметров получены экспериментальные данные о распределении дозы в макете сверхпроводящего магнита при различном падении на него пучка заряженных частиц.

Практическая значимость работы

1. Разработанный криогенный calorиметрический дозиметр, обладающий чувствительностью не хуже 0,01 Гр и работоспособный в полях магнитной индукции до 5 Тл, может быть использован в экспериментальных исследованиях дозного поля внутри сверхпроводящих магнитов и дру-

гих криогенных мишенях при их импульсном облучении высокоэнергетическими заряженными частицами.

2. Полученная с помощью представленного дозиметра экспериментальная информация о дозах от ускоренных релятивистских ядер может служить тестом для разрабатываемых расчётных программ.

3. Рассмотренные дозиметры на основе термометров ТВО, Аллен-Бредли и медноникелевого сплава пригодны после соответствующей градуировки для определения дозы высокоэнергетического излучения в тонких криогенных мишенях.

4. Созданная на основе калориметрических дозиметров с медным поглотителем (МКД) система регистрации доз в обмотках магнитов модельного сверхпроводящего синхротрона ("СПИН") облегчит настройку ускорителя и позволит ускорить создание аналогичной системы для нуклотрона.

Автор защищает:

1. Методику определения дозы поля смешанного импульсного излучения в элементах конструкций сверхпроводящих ускорителей заряженных частиц.

2. Разработанный криогенный калориметрический дозиметр нового типа и исследование его характеристик.

3. Результаты экспериментальной проверки системы дозиметрических измерений с калориметрическими дозиметрами в пучках высокоэнергетических заряженных частиц и в полях смешанного импульсного излучения.

4. Результаты сравнительного анализа измеренных и рассчитанных пространственных распределений дозы в макете сверхпроводящего магнита нуклотрона при облучении его частицами высоких энергий.

5. Способ измерения теплоёмкости миниатюрных термометров сопротивления криогенных температур.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на научных семинарах в МИФИ, Научно-исследовательского криогенного отдела ЛВЭ ОИЯИ, отделов ускорителя ЛВЭ ОИЯИ (1981-1984 г.г.) и на III Всесоюзном семинаре "Автоматизация исследований в ядерной физике и смежных областях" (Тбилиси, 1984 г.).

По материалам выполненных исследований опубликовано 5 печатных работ, приведенных в списке литературы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, двух приложений и заключения, содержит 114 страниц машинописного текста, в том числе 40 рисунков, 12 таблиц и библиографию из 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Во введении отмечается актуальность представленной работы, а также её место в проблеме создания и эксплуатации ускорителей на сверхпроводящих элементах. Сформулирована основная цель работы: разработка методики и дозиметров для измерения дозы в материале сверхпроводящих обмоток магнитов ускорителей высоких энергий от импульсного поля смешанного ионизирующего излучения.

Формирование дозного поля смешанного излучения на ускорителях и его измерения

В первой главе на основании литературных данных рассмотрены источники излучения на высокоэнергетических ускорителях, основные механизмы формирования дозы в СПО и способы её измерения. Как показано в ряде работ, при ускорении и выводе заряженных частиц происходят неизбежные их потери по периметру ускорителя. Анализ механизмов формирования дозы показывает, что при энергиях первичных частиц до нескольких десятков ГэВ основной вклад в дозу вносят ионизационные потери высокоэнергетических заряженных первичных частиц и заряженных частиц, образованных на каскадной стадии взаимодействия, а также низкоэнергетические частицы (p, d, \dots), образованные в неупругих взаимодействиях высокоэнергетических частиц вблизи точки детектирования. При энергиях первичных частиц более 30-50 ГэВ доза обуславливается электронно-фотонным ливнем, образующимся в результате распада J^0 -мезонов.

Из-за неравномерности потерь частиц по периметру ускорителя в отдельных "горячих" точках, например, на участке ввода-вывода и вблизи внутренних мишеней, абсолютные значения дозы могут достигать нескольких Гр за один цикл ускорения. Исследования проведенных в ряде лабораторий мира со сверхпроводящими магнитами различных типов показывают, что величины доз такого порядка влияют на работу магнита. Радиационный разогрев СПО может приводить к образованию нормальных зон в обмотке и переходу магнитов в нормальное состояние. Из этого следует необходимость производить постоянный дозиметрический контроль магнитов с целью обеспечения безаварийной работы и оптимальной настройки ускорителей.

Вследствие больших радиационных градиентов дозного поля в СПО магнитов дозиметры систем контроля должны находиться вблизи СПО и при этом обладать следующими характеристиками: высокой чувствительностью по дозе ($< 0,1$ Гр); быстродействием, необходимым для измерения дозы за каждый цикл ускорения; нечувствительностью к переменным магнитным полям вплоть до ~ 5 Тл, по возможности минимальными

геометрическими размерами. Кроме того, эти дозиметры должны надежно работать в условиях криогенных температур.

Анализ методов измерения доз и дозиметров, обычно используемых на ускорителях, показывает значительное расхождение их показаний в зависимости от условий облучения, так как при этом изменяется как компонентный, так и энергетический состав излучения. Помимо этого, они не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

В последних исследованиях влияния дозы на работу сверхпроводящих магнитов всё чаще используют калориметры различных конструкций. Вследствие того, что показания калориметров являются абсолютными, по ним производят градуировку дозиметров других типов и тестирование программ для расчёта доз высокоэнергетического излучения в магнитах. Однако невысокая чувствительность данных калориметров, малое быстродействие и ряд других параметров не позволяют использовать их в системах оперативного контроля дозы при криогенных условиях. Имеются отдельные сообщения о криогенной калориметрии ионизирующего излучения, обладающей очень высокой чувствительностью по дозе, что достигается за счёт уменьшения теплоёмкости калориметра при понижении его температуры до 0,1 К и применением термометров, имеющих высокую температурную чувствительность. Но предназначенные для иных целей, они имеют малое быстродействие, большие габариты и сложную конструкцию.

Как известно, калориметры состоят из поглотителя, термометра и оболочки, причём основным элементом, определяющим чувствительность калориметра по дозе, является термометр. Обзор по термометрии выявил классы термометров, пригодных для использования в криогенных условиях работы сверхпроводящих ускорителей. Однако не найдено термометра, полностью удовлетворяющего поставленным требованиям.

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

- разработать методику измерения дозы импульсного излучения ускорителей высоких энергий;
- разработать дозиметр на основе калориметрического метода определения дозы и исследовать его теплофизические характеристики;
- провести исследование работы дозиметра в полях высокоэнергетического излучения;
- исследовать пространственное распределение дозы в макете сверхпроводящего магнита с помощью предложенных дозиметров и рассмотреть вопросы, связанные с автоматизацией измерений распределения дозы по периметру ускорителя системой криогенных дозиметров.

Методика измерения дозы импульсного высокоэнергетического излучения в СПО магнитов ускорителя

Доза в поглотителе калориметра определяется по известной его теплоёмкости и изменению температуры, регистрируемому термометром. Оценки дозы в материале поглотителя (элементы с атомным весом $A = 56+64$) и термометра (углерод), произведенные в характерных полях высокоэнергетического излучения при энергиях первичных заряженных частиц 1-30 ГэВ (протоны), показывают, что вклад в дозу от ионизационных потерь в этих элементах составляет 70-80%. Причём доза в материалах типа углерод в отдельных случаях может в ~2 раза превышать дозу в материалах типа железо-медь.

Для измерения дозы в СПО калориметр размещается непосредственно внутри обмотки. В этом случае устанавливается равновесие вторичного излучения, и уменьшение размеров калориметра не критично. Когда калориметр расположен вдали от обмоток, размеры поглотителя калориметра выбираются из условия минимума утечек вторичного излучения. В работе показано, что при облучении калориметра в поле излучения с максимальной энергией несколько ГэВ линейные размеры поглотителя должны быть $\gg 1$ мм.

Для измерения дозы за каждый цикл ускорения необходимо, чтобы калориметр имел быстродействие порядка 1-2 секунд. Вследствие этого был выбран квазиадиабатический режим его работы. Увеличение чувствительности калориметра до 0,01 Гр достигнуто применением меди в качестве поглотителя, имеющей минимальную теплоёмкость при криогенных температурах, и высокочувствительного миниатюрного угольного термометра сопротивления, обладающего большим быстродействием. Оценки показывают, что при подборе таких параметров, как масса, постоянные релаксации температуры термометра τ_T и поглотителя τ_n ($\tau_T \ll \tau_n$), можно обеспечить точность измерения дозы за импульс излучения t_n не хуже, чем 10%, даже если мощности доз в поглотителе и термометре отличаются более чем на порядок. При этом доза в поглотителе определяется простым соотношением:

$$D = \int_{T_0}^{T_T} c_n(T) dT, \quad (1)$$

где $c_n(T)$ - теплоёмкость поглотителя, T_0 и T_T - начальная и конечная температура термометра соответственно. Естественно, что данным калориметром можно измерять мощность дозы медленно изменяющегося излучения ($\tau_n \ll t_n$). В этом случае: $P = \frac{K(T)}{m} \Delta T$, где $K(T)$ - теплопередача поглотителя окружающей среды, m - масса поглотителя, ΔT - измерение его температуры.

В работе также изложена методика приближенной оценки малых доз

(небольшие перегревы калориметра) при длительности импульса излучения, близком к постоянной релаксации поглотителя ($t_{и} \approx \tau_{п}$).

Исследование теплофизических характеристик термометров-дозиметров

На основании литературного обзора по термометрии выявлены классы термометров, пригодных для применения в калориметрах, предназначенных для работы в ускорителях на сверхпроводящих элементах. К этим классам относятся угольные термометры сопротивления, некоторые полупроводниковые и ёмкостные термометры, а также термометры, изготовленные из специального медноникелевого сплава, по составу сходного с материалом СПО. Исследование термометрических характеристик этих термометров позволило остановить выбор на угольных термометрах Аллен-Бредли, ТВО и термометре на основе специального медноникелевого сплава. С целью повышения чувствительности по дозе разработанного нами был изготовлен из серийного резистора Аллен-Бредли высокого номинального сопротивления ($R_0 = 1,2 \text{ кОм}$) и исследован миниатюрный дисковый угольный термометр сопротивления, обладающий повышенной температурной чувствительностью $\alpha = \left(\frac{dR}{dt} \cdot \frac{100}{R} \right) 4,2 \text{ К} = 43\% \cdot \text{К}^{-1}$ и быстродействием $\tau_{4,2 \text{ К}} \approx 20 \text{ мкс}$.

Для оценки быстродействия термометров в различных заделках была предложена методика измерения их постоянных релаксаций температуры. В диссертации приведены результаты апробации этой методики для термометров Аллен-Бредли, ТВО и термометра, изготовленного нами из медноникелевой термометрической проволоки в парах гелия в диапазоне температур 4,2–10К.

На основании методики измерения дозы, изложенной во втором разделе диссертации, был разработан и изготовлен квазиadiaбатический калориметр (рис. 1), состоящий из двух медных одинаковых и соосных цилиндров I, служащих поглотителем и помещенного между ними дискового термометра сопротивления 2.

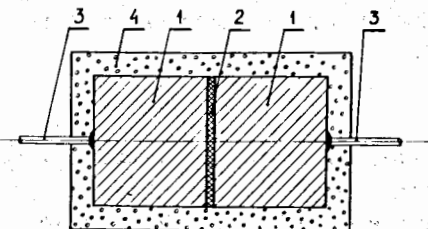


Рис. 1. Схема калориметрического дозиметра с медным поглотителем (обозначения в тексте).

Термометр имеет тепловой и электрический контакт с поглотителем. Электрические выводы 3 присоединены к торцам медных цилиндров I. Вся сборка заключена в теплоизолирующую оболочку 4.

Вследствие того, что измеряемой величиной калориметров является температура, они нуждаются в градуировке. Градуировочной величиной в калориметрах является их теплоёмкость. Зависимости теплоёмкости калориметрического дозиметра с медным поглотителем (МКЦ), термометров ТВО-0,125 и Аллен-Бредли ($P = 1/8 \text{ Вт}$; $R_0 = 100 \text{ Ом}$) от температуры в диапазоне температур 4,2–10 К получены известным методом термической релаксации. Теплоёмкость дозиметра на основе медноникелевого сплава, в котором термочувствительная проволока является как термометром, так и поглотителем, была измерена предложенным нами импульсным способом. Этот способ заключается в одновременном нагревании термометра, находящегося в вакуумируемом объёме, коротким импульсом тока, и измерении фронта нарастания температуры, по которому из выражения, приведенного в работе, определяется теплоёмкость. Данный способ позволяет оценивать теплоёмкость миниатюрных термометров непосредственно в местах их установки, так как при времени измерения $\sim 1 \text{ мс}$ в них существуют адиабатические условия. Зависимость теплоёмкости датчиков от температуры $C(T)$ в диапазоне 4,2–10К хорошо аппроксимируется аналитическим выражением $C(T) = AT^3 + BT$. Значения коэффициентов A и B для датчиков, используемых в экспериментах на пучке заряженных частиц, приведены в таблице.

Исследование работы дозиметров в полях высокоэнергетического излучения

В четвёртом разделе диссертации представлены результаты экспериментальной проверки работы медного калориметрического дозиметра (МКЦ) и дозиметра, изготовленного из медноникелевой проволоки (МНЦ) при облучении их протонами с энергией 2,55 ГэВ и дейтронами 7,31 ГэВ на синхрофазотроне ОИИИ. Обсуждается возможность использования серийных термометров ТВО и Аллен-Бредли (АБ) в качестве дозиметрических датчиков.

Для проведения измерений нами разработана установка, состоящая из криостата, в облучаемой части которого были расположены исследуемые дозиметры, и системы мониторинга пучка. Эта система включала в себя многопроволочную ионизационную камеру для определения геометрического профиля пучка, плоскопараллельную камеру для измерения флюенса ускоренных частиц за импульс облучения, и сцинтилляционный детектор для определения временной структуры импульса и запуска измерительной аппаратуры.

Астировка установки относительно оси пучка и контроль геометрического профиля пучка производились с помощью рентгеновских плёнок.

Облучаемая часть криостата представляла собой модель участка СПО магнита проточного типа в проекте ускорителя "Нуклотрон" и содержала два трубчатых сверхпроводника, наполненных жидким гелием, между которыми размещены дозиметры МКД, ТВО, АБ. МНД был изготовлен в виде обмотки из медноникелевой проволоки на одной из труб. После теплоизоляции дозиметров несколькими слоями фторопластовой плёнки вся сборка заливалась эпоксидным компаундом. Сечение облучаемой части криостата в месте расположения дозиметров показано на рис. 2.

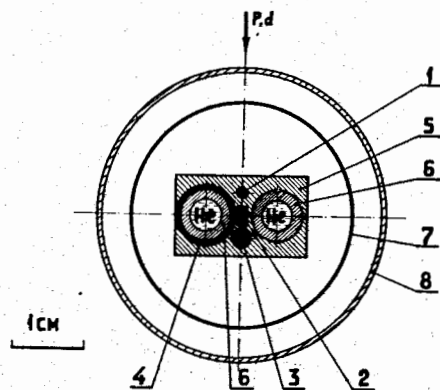


Рис. 2. Сечение облучаемой части криостата.

1. АБ
2. ТВО
3. МКД
4. Эпоксидный компаунд
5. МНД
6. Трубчатый сверхпроводник
7. Азотный экран
8. Корпус криостата

Экспериментально полученные зависимости энерговыведения от флюенса протонов и дейтронов за импульс при его длительности $t_{и} = 6$ мс определялись исходя из выражения (1), так как в этом случае $t_{и} \ll \tau_{п} = 50+60$ мс. Представленные для различных дозиметров зависимости носят линейный характер. Коэффициенты перехода от флюенса протонов и дейтронов к энерговыведению для каждого из дозиметров представлены в таблице.

Таблица. Коэффициенты теплоёмкости и перехода от флюенса к энерговыведению

Дозиметр	R_{290K} , Ом	m , г	$C(T) = AT^3 + BT$, Дж/К ϵ , Дж·см ² /част.			
			A	B	$E_d = 7,31$ ГэВ	$E_p = 2,55$ ГэВ
МКД	16	0,250	$4,46 \cdot 10^{-7}$	$7,59 \cdot 10^{-6}$	-	$6,5 \cdot 10^{-14}$
МНД	2170	0,104	$1,86 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$2,9 \cdot 10^{-14}$
ТВО	1000	0,080	$2,06 \cdot 10^{-7}$	0	$2,4 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-14}$
АБ	100	0,025	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$6,80 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-15}$	$7,2 \cdot 10^{-15}$

Рассеянное поле высокоэнергетического излучения создавалось железным барьером.

За барьером располагались исследуемые дозиметры. Дозиметры на основе резисторов ТВО и Аллен-Бредли располагались на оси пучка, а МНД был смещен на 0,5 см относительно этой оси. Результаты экспериментальных и расчётных зависимостей дозы от толщины железного барьера и геометрия облучения, показанные на рис. 3, в пределах погрешностей эксперимента и расчёта совпадают.

Была оценена также доза от импульса протонов с длительностью $t_{и} > \tau_{п}$. Измерения проводились с помощью МКД по методике, описанной во втором разделе работы. Коэффициент перехода от флюенса к дозе в этом случае оказался равным $1,9 \cdot 10^{-10}$ Гр/см²·протон, что на 17% отличается от расчётного и на 26% - от коэффициента, полученного при облучении дозиметра коротким импульсом излучения $t_{и} \ll \tau_{п}$.

Предел чувствительности по дозе определяется температурной чувствительностью термометра, примененного в калориметре, и для дозиметров МКД, ТВО и АБ при 4,2 К составляет $\approx 3 \cdot 10^{-3}$ Гр. Для МНД эта величина на порядок больше. В проведенных экспериментах из-за наводок и шумов измерительной аппаратуры уверенно регистрировались сигналы, обусловленные дозой $10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}$ Гр. Погрешность измерения дозы оценена $\approx 10\%$ и определяется в основном точностью измерения теплоёмкости дозиметров.

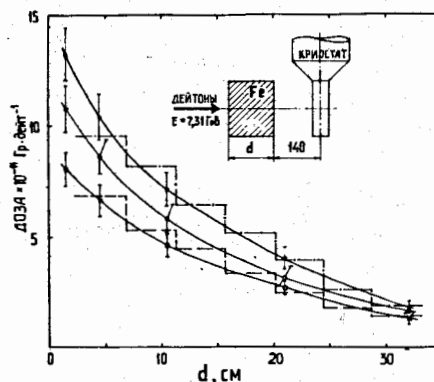


Рис. 3. Зависимость дозы от толщины железного барьера при облучении его пучком дейтронов с энергией 7,31 ГэВ

- - АБ
- - ТВО
- - МНД
- - - - расчёт /3,4/ (y = 0 см)
- · - · - расчёт /3,4/ (y = 0,5 см)

Приведенные измерения показывают возможность применения рассмотренных датчиков в качестве дозиметров высокоэнергетического излучения. Однако дозиметры на основе ТВО и Аллен-Бредли требуют предварительной градуировки.

Применение криогенных калориметрических дозиметров для определения дозовых нагрузок на элементы сверхпроводящих ускорителей

Измерение пространственного распределения дозы в геометрической копии магнита проектируемого ускорителя "Нуклотрон" проводились с по-

мощью представленных калориметрических дозиметров. Для дополнительного контроля применялась напёрстковая латунная ионизационная камера. Макет магнита (рис. 4) с габаритами 190x160x1000 мм³ состоял из 10 секций I длиной по 100 мм. Облучаемая насадка криостата 2 со сборкой калориметрических дозиметров 3 и напёрстковая ионизационная камера 4 вставлялись в специальные каналы секций. Перестановка секций с каналами позволяла изменять их положение по оси Z. Мониторирование пучка и установка установки аналогичны описанным в разделе 4.

Макет магнита облучался протонами с $E_p = 2,55$ ГэВ длительностью импульса 6 мс. Геометрия облучения показана на рис. 4.

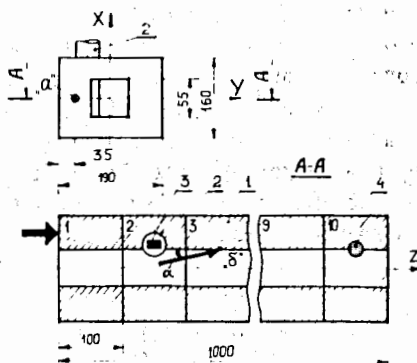
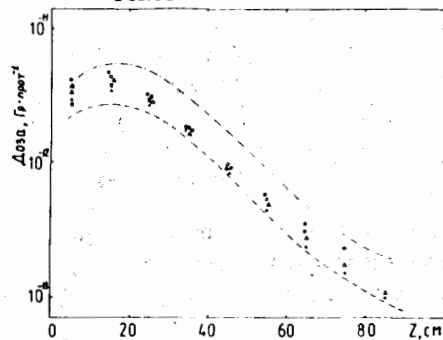


Рис. 4. Схема экспериментальной установки (обозначения в тексте)



Экспериментально измеренное распределение дозы по длине магнита Z при падении пучка протонов на торец магнита и на внутреннюю поверхность под углом $\alpha = 33$ мрад показаны на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

Рис. 5. Распределение дозы при гашении пучка протонов в торце магнита (точка "а"):

△ - МКД; □ - МНД; ● - ТВО;
○ - Аллен-Бредли; ▲ - напёрстковая ионизационная камера; - - - расчёт по ^{3,4/};
— — — расчёт по ^{5/}.

Результаты, полученные при облучении магнита в торец, сравнивались с расчётами дозы, проведенными по программе "Magnet"^{5/} и программе, разработанной в ЛВТА ОИЯИ^{3,4/}, ранее апробированным.

В диссертации проведен анализ полученных результатов.

Для использования в системе контроля дозы в СПО магнитов синхротрона "СПИН" (ОИЯИ) разработан вариант конструкции криогенного калориметрического дозиметра с медным поглотителем. Анализ теплофизических характеристик партии из 8 штук таких калориметров показал, что их теплоёмкость описывается аналитической зависимостью $C(T) = AT^3 + BT$. Значения коэффициентов A и B для различных дозиметров в пределах погрешности измерения теплоёмкости ($\approx 10\%$) совпадают. Зависимости $r(T)$ для термометров, примененных в калориметрах, выраженные в относительных единицах и нормированные на единицу при $T = 4,2$ К, совпадают не хуже $\sim 0,1\%$, что позволяет определять температуру по сопротивлению термометра по единой для всех датчиков формуле:

$$T = R_{4,2K} \cdot \sum_{n=1}^m L_n (r_{4,2K} / r)^n$$

где L_n - постоянные коэффициенты; $R_{4,2K}$ - сопротивление термометра при $T = 4,2$ К; $r_{4,2K}$ и r - относительные сопротивления термометра при температуре 4,2 К и температуре T соответственно с погрешностью $\sim 0,5\%$.

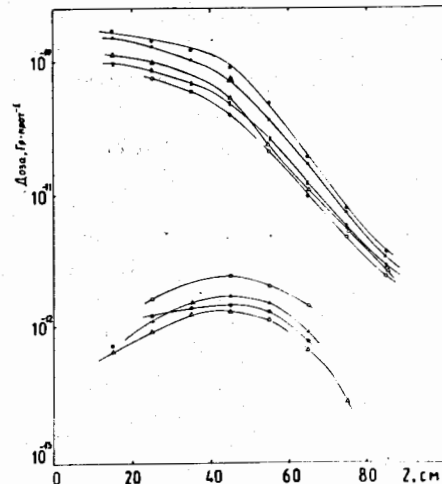


Рис. 6. Распределение дозы при гашении пучка протонов с осью в точке "б" под углом $\alpha = 33$ мрад; вблизи поверхности высадки протонов - верхние кривые; вблизи противоположной поверхности - нижние кривые (обозначения, как на рис. 5).

Аналитические зависимости указанных теплофизических параметров позволяют производить быструю машинную обработку информации, поступающей с дозиметров, и создавать автоматизированные системы контроля дозы в СПО-магнитов сверхпроводящих ускорителей.

Основные результаты диссертации

I. Предложена калориметрическая методика измерения дозы в материалах технических сверхпроводников СПО магнитов ускорителей (1-50 ГэВ) от импульсного высокоэнергетического излучения.

2. На основании предложенной методики измерения дозы разработан калориметрический криогенный дозиметр импульсного излучения с медным поглотителем (МКД), обладающий пределом чувствительности по дозе $\sim 0,003$ Гр и малыми линейными размерами (порядка нескольких миллиметров), позволяющими располагать этот дозиметр в непосредственной близости от СПО.

3. Разработан способ измерения теплоёмкости миниатюрных термометров сопротивления, используемых в калориметрах, и на её основе создана установка для проведения измерений теплоёмкости этих термометров в диапазоне температур 4,2 - 15К. С её помощью можно также оценивать постоянные релаксации термометров сопротивления, помещенных в различные среды.

4. Из анализа литературных данных по термометрии выбраны классы термометров, пригодных для эксплуатации в криогенных ускорителях. Исследованы характеристики нескольких типов термометров этих классов и выбраны термометры, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к термочувствительным элементам криогенных калориметров. Из серийного резистора фирмы Аллен-Бредли изготовлен высокочувствительный ($\alpha_{4,2\text{K}} \approx 50\% \cdot \text{K}^{-1}$) малоинерционный ($\tau_T \approx 20$ мкс) дисковый миниатюрный термометр сопротивления, обладающий хорошей температурной стабильностью.

5. Рассмотрена возможность применения калориметрических дозиметров на основе термометров ТВО, Аллен-Бредли и термометра, изготовленного из специального медноникелевого сплава для измерения доз в СПО от радиационных полей с преобладанием первичного высокоэнергетического излучения, и проверена их работа при облучении дейтронами с энергией $E_d = 7,31$ ГэВ, протонами $E_p = 2,55$ ГэВ и смешанным излучением, создаваемым пучком высокоэнергетических ускоренных частиц при его гашении в железных барьерах различной толщины.

6. Рассмотрены методы определения дозы и её мощности калориметрическим дозиметром с медным поглотителем при его облучении импульсным излучением различной длительности: $t_n \ll \tau_n$, $t_n \approx \tau_n$, $t_n \gg \tau_n$.

7. На основе представленных дозиметров создана экспериментальная установка для измерения распределения дозы в модели магнита проектируемого ускорителя "Нуclidотрон" при различных геометриях его облучения протонами с $E_p = 2,55$ ГэВ. Полученные данные сравнивались с расчётами и показали хорошее соответствие в пределах экспериментальной и расчётной погрешности.

8. Разработан вариант конструкции МКД, предназначенный для модельного сверхпроводящего синхротрона ("СПИИ"), и создана система

контроля распределения дозы на участке ввода-вывода ускорителя. При этом рассмотрены вопросы, связанные с автоматизацией измерений.

Результаты работы могут быть использованы при разработке систем контроля дозы и на других ядерно-физических установках, использующих сверхпроводящие элементы, а также при проведении научных экспериментов на ускорителях с различными криогенными мишенями.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Инерционные характеристики криогенных термодатчиков-дозиметров /В.И.Дацков, Л.Н.Зайцев, Е.Д.Клещенко, С.В.Мунтян. Дубна: препринт ОИЯИ 8-83-45, 1983.

2. Дацков В.И., Клещенко Е.Д., Мунтян С.В. Измерение теплоёмкости резистивных термодатчиков при криогенных температурах. Дубна: препринт ОИЯИ 8-83-878, 1983; //Приборы и техника эксперимента. 1985. № 1. С. 233-235.

3. Дацков В.И., Зайцев Л.Н., Мунтян С.В. Результаты измерения характеристик криогенных термодатчиков-дозиметров на пучке синхротрона. Дубна: препринт ОИЯИ 9-84-432, 1984.

4. Измерение поглощённой энергии в элементах магнитов ускорителей с помощью криогенных калориметрических дозиметров /В.И.Дацков, Л.Н.Зайцев, С.В.Мунтян и др. Дубна: препринт ОИЯИ 16-84-677, 1984.

5. Зайцев Л.Н., Мунтян С.В., Смирнов В.И. Система автоматизированных исследований ускоренных частиц и ядер высоких энергий /Сборник аннотаций III Всесоюзного семинара "Автоматизация исследований в ядерной физике и смежных областях". Изд. ТГУ, Тбилиси. 1984. С. 46-47.

Цитированные работы

1. Дацков В.И. Приборы и техника эксперимента. 1981. № 4. С. 253-254.

2. Вешек Я. Измерение низких температур электрическими методами. М.: Энергия, 1980.

3. Барашенков В.С., Мусульманбеков Е.Ж., Шмяков С.Ю. Зависимость характеристик неупругих ядерных взаимодействий от массы высокоэнергетической налетающей частицы. Дубна: препринт ОИЯИ P2-81-202, 1981.

4. Барашенков В.С., Жереги Ф.Г., Мусульманбеков Ж.Ж. Каскадный механизм неупругих взаимодействий высокоэнергетических ядер. Дубна: препринт ОИЯИ Р2-83-117, 1983.

5. Исследование пространственно-энергетического распределения излучения в элементах структуры высокоэнергетических ускорителей (макетный эксперимент) /Л.Н.Зайцев, В.П.Зорин, С.А.Новиков и др. Дубна: препринт ОИЯИ I6-I2264, 1979. Т.2: Характеристики поля излучения при взаимодействии протонов с тонкой мишенью.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 декабря 1986 года.