



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2004–51
На правах рукописи

Селезнёв Владимир Сергеевич

**УНИФИЦИРОВАННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ
КАНАЛОВ И УСКОРИТЕЛЕЙ**

01.04.23 – физика высоких энергий

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2004

Работа выполнена в ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
(г. Протвино)

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук, профессор В.Н. Болотов (ИЯИ, г. Троицк), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук В.Ф. Образцов (ИФВЭ г. Протвино), доктор физико-математических наук В.Н. Ройнишвили (ОИЯИ, г. Дубна).

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2005 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, 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 темы

Наиболее крупные достижения фундаментальной науки, и в первую очередь физики частиц высоких энергий, связаны с созданием сложнейших экспериментальных установок и проведением измерений на пучках ускорителей. Современные протонные ускорители обладают развитой системой каналов частиц с внешними мишенями. Актуальность темы обуславливается необходимостью разработки унифицированных детекторов регистрации основных параметров выведенных пучков ускорителя ИФВЭ и систем диагностики на их основе.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей диссертационной работы является создание и внедрение унифицированных, надежных, дешёвых детекторов и систем диагностики пучков заряженных частиц.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту:

1. Разработаны, созданы и внедрены на каналах отпаянные приборы измерений интенсивности квазипостоянных пучков. В диапазоне интенсивности $10^{10} - 10^{13}$ р/цикл – это вторичноэмиссионные камеры, в диапазоне $10^7 - 10^{10}$ р/цикл – газонаполненные ионизационные камеры. Отпаянные камеры выпускались в Опытном производстве ИФВЭ мелкими партиями.
2. Впервые в мировой практике предложена новая формализованная концепция мониторинга потерь пучка заряженных частиц высоких энергий, позволяющая этой системе из разряда второстепенных (качественных) перейти в разряд основных, т.е. количественных. Подобная система была успешно апробирована на самом интенсивном канале комплекса ИФВЭ.
3. Предложен оригинальный (2л-) дизайн радиационных мониторов, позволяющий реализовать упомянутую выше концепцию измерений потерь. По-

степенное развитие концептуальной конструкции этих детекторов привело к созданию универсального модульного радиационного монитора. Серийный выпуск таких мониторов освоен в ОЭП ИФВЭ.

4. Создан унифицированный ряд плёночных профилометров, вносящих в пучок очень малое количество вещества ($\sim 5 \text{ мг/см}^2$), с шагом 1–10 мм. Использование таких профилометров на самом высокоинтенсивном канале №8 позволило наряду с другими мерами работать без наращивания биологической защиты. Мелкосерийный выпуск "тонких" профилометров освоен в ОЭП ИФВЭ.
5. Разработаны тонкие (15 мг/см^2) на полиимидной основе сцинтиллирующие пленки, и оптические профилометры с использованием таких плёнок внедрены в практику диагностики пучков.
6. Создан универсальный в вакуумном исполнении профилометр для работы в диапазоне интенсивностей 10^5 – 10^{13} част/с и ряд специфичных приборов "околомишенной" диагностики пучка, способных работать в пучках высокой плотности и в тяжелых температурных, радиационных условиях.
7. Разработаны длинные и прецизионные полосковые пикапы диагностики циркулирующих во встречных направлениях протонных и антипротонных пучков "Главного инжектора" и "Рециркулятора" для ФНАЛ. Эти мониторы работают в условиях сверхвысокого (10^{-10} тор) вакуума.
8. Предложен сверхчувствительный радиационный монитор для сверхпроводящих (SSC, УНК) ускорителей на высокие энергии, позволяющий избежать квенчей, обусловленных потерями пучка. Значительное увеличение чувствительности по сравнению с газонаполненной ионизационной камерой достигается за счёт размещения монитора в максимуме адронного ливня и использования жидкого гелия в качестве рабочей среды детектора.
9. Разработаны прецизионные (20 мкм) мониторы для измерения геометрических параметров пучков синхротронного излучения накопителя и коллайдера ДЕЗИ. Предложенная конструкция мониторов позволяет работать в условиях сверхвысокого (10^{-11} тор) вакуума без принудительного охлаждения.
10. Рассмотренные унифицированные детекторы нашли широкое применение в системах диагностики выведенных пучков ИФВЭ, канала инжекции УНК, экспериментального комплекса ММФ ИЯИ РАН, а также в других ускорительных центрах СНГ. Детекторы, рассмотренные в диссертации, выставались на многих выставках, три из них удостоены медалей ВДНХ.

Практическая ценность

Практическая ценность исследований и разработок, входящих в диссертацию, заключается прежде всего в том, что их реализация позволила обеспечить выполнение программы исследований по физике частиц высоких энергий

ИФВЭ. Кроме того, все основные приборы диагностики пучка имеют необходимую конструкторскую и технологическую документацию, позволяющую организовать их мелкосерийное производство в ОЭП ИФВЭ. С их применением выполнены все системы диагностики выведенных пучков ускорителя ИФВЭ, а также ряда других институтов.

Апробация работы и публикации

Работы, составляющие основу содержания диссертации, опубликованы в журналах "Приборы и техника эксперимента" [4, 20, 27, 35], "Nuclear Instruments and Methods" [42, 49], в сборнике "Обработка физической информации" [30]. На два изобретения, связанных с темой диссертации, получены авторские свидетельства [9, 50]. Ряд работ докладывался и опубликован в трудах международных и национальных конференций, таких как:

"European Particle Accelerator Conference" [7, 11, 16, 44, 45];

"International Conference on High Energy Accelerators" [10, 13, 26];

"International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics

Control Systems" [3, 28, 37, 38, 51]; "EPS Conference on High Energy Physics" [47];

"Workshop on Advanced Beam Instrumentation" [40, 49];

"Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator"

[25, 46]; "Совещание по ускорителям заряженных частиц" [2, 12, 17, 32, 36, 39, 41,

48, 52]; "Семинар по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях" [1, 31];

а также в виде препринтов ИФВЭ [5, 6, 8, 4, 15, 18, 19, 21–24, 30, 33, 34, 43].

Объём и структура диссертации

Диссертация изложена на 158 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержит 120 рисунков, 12 таблиц и список цитируемой литературы из 155 наименований.

Содержание работы

Во введении рассматриваются причины, стимулировавшие развитие унификации подходов в задачах диагностики пучков на каналах выведенных пучков.

Вопросы создания детекторов пучков и систем диагностики на их основе, освещенные в данной диссертации, охватывают более чем двадцатилетний период и не могут рассматриваться отдельно от динамики развития экспериментальной базы физики частиц высоких энергий в ИФВЭ. Так, в начале восьмидесятых годов из выведенных интенсивных пучков существовал только канал № 8 (запущенный в 1974 г.) с небогатым ассортиментом средств диагностики пучка, разработанным отдельными физическими группами. Интенсивность пучка тогда не превышала 3×10^{12} протон/цикл при длительности вывода от десятков наносекунд до нескольких микросекунд. При этом довольно частыми были запреты

вывода пучка из-за срабатывания динамической блокировки системы радиационной безопасности. На тот период времени в ИФВЭ существовали амбициозные планы как дальнейшего развития экспериментальной базы, так и строительства ускорительно-накопительного комплекса (УНК).

На **рис. 1** показана реализованная к середине девяностых годов схема выведенных пучков ускорителя У-70, а в **табл. 1** приведены их основные параметры.

Таблица 1. Параметры выведенных пучков из ускорителя У-70.

Параметры Вид Вывода	Энергия, ГэВ	Интенсивность, част/вывод	Длительность вывода	Временная структура
Быстрый (БВ)	70	$10^{10} - 1.5 \cdot 10^{13}$	15 нс – – 5 мкс	1 – 30 банчей длительностью 15–30 нс период следования 165 нс
Быстрый резонансный (БРВ)	70	$5 \cdot 10^{11} - 1.5 \cdot 10^{13}$	30–150 мкс	Несколько пачек (3–5) с интервалом 15 мкс
Резонансный медленный (РМВ)	70	$10^{11} - 1.5 \cdot 10^{13}$	0.01 – 2 с	В идеале – прямоугольный импульс, часто структура
Дифракционный (ДВ)	70	$10^6 - 10^{11}$	0.01 – 2 с	Структуры нет
Медленный через кристалл (МКК)	70	$10^6 - 2 \cdot 10^{11}$	0.01 – 2 с	Структура приемлемая
Вторичные пучки с внешних мишеней	10–60	$10^4 - 10^9$	0.01 – 2 с	Структура первичного пучка

Период работы ускорительного комплекса – 1 раз в 8 с.

Эмиттанс пучка – $\sim 2 \pi$ мм·мрад. в каждой плоскости.

Учитывая громадный объём предстоящей работы по созданию детекторов и систем, связанный как с разнообразием используемых пучков, так и с большой протяженностью ($\sim 3,5$ км) трасс, а также с ограниченностью ресурсов, в ИФВЭ был выбран курс на разработку набора унифицированных средств [1, 2, 3]. В основу этого набора были положены следующие принципы:

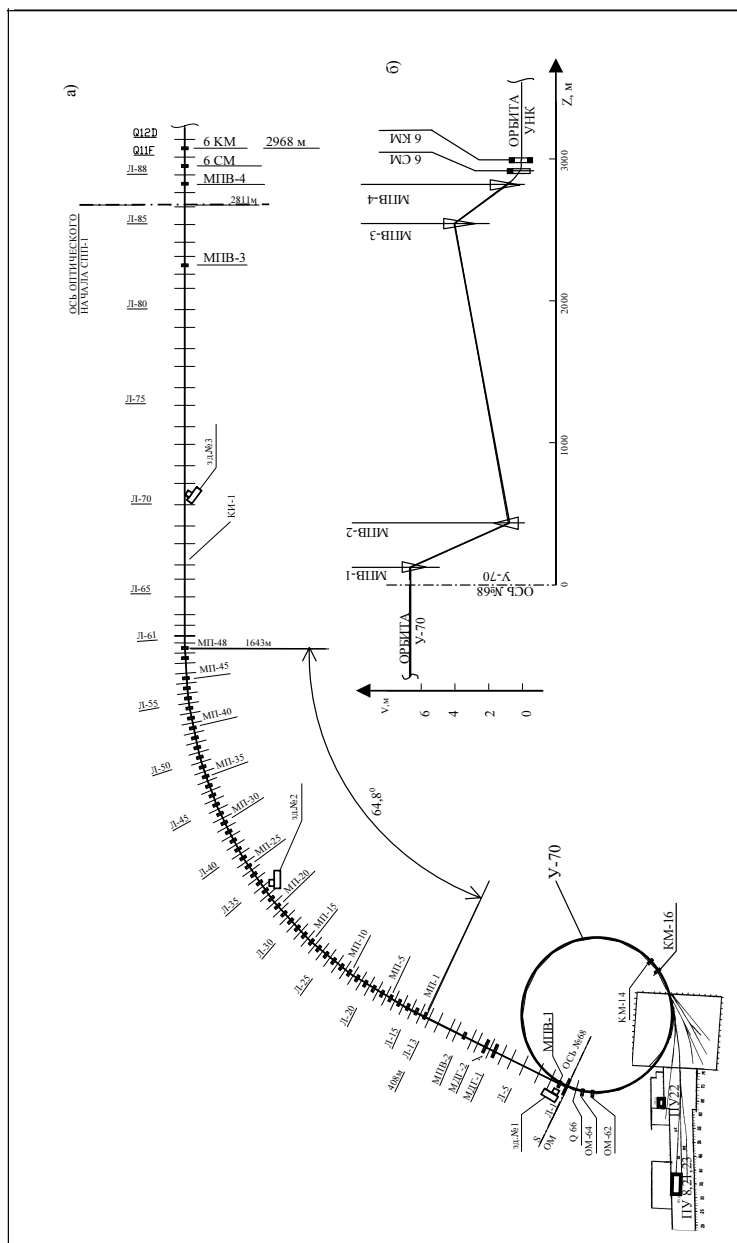


Рис. 1. Схема выведенных пучков ускорителя У-70 в плане (а) и вертикали (б).

- простота, надежность и высокий эксплуатационный ресурс;
- механическая и электрическая нормализация разновидностей приборов одного класса;
- разработка полного комплекта конструкторской документации как на детектор, так и на механизм его ввода/вывода в пучок;
- разработка технологической документации, изготовление необходимой оснастки для освоения мелкосерийного производства;
- использование разнообразных возможностей опытного производства для получения полностью готового к эксплуатации прибора;
- создание стендов для вакуумных, механических и электрических испытаний;
- обеспечение возможности дистанционного тестирования смонтированных на канале диагностических средств.

Серьезным фактором в пользу такой унификации стали и весьма сжатые сроки создания новых систем.

Первая глава диссертации посвящена детекторам для измерения наиболее важного параметра пучка – интенсивности. Данные по интенсивности обычно используются непосредственно для абсолютной нормировки в любом эксперименте на выведенном пучке, и поэтому особенно важна точность, стабильность и надёжность этих измерений. И если при быстром выводе пучка существуют хорошо зарекомендовавшие себя абсолютные радиотехнические методы измерения интенсивности [4, 5, 6], то при квазипостоянном во времени выводе, а именно такой используется для экспериментов с электронной методикой, существуют некоторые особенности.

Наиболее распространённой на сегодняшний день методикой измерения высокоинтенсивных, "растянутых" во времени пучков является использование явления вторичной электронной эмиссии из металлов. К несомненным достоинствам этого метода относятся:

- линейность и отсутствие эффектов насыщения ;
- безынерционность;
- независимость вольтамперной характеристики от плотности;
- хорошее пространственное разрешение;
- простота конструкции детекторов.

Интенсиметрами такого типа оснащены все крупные центры мира, имеющие медленный вывод пучка из ускорителя. Однако собранная за многие годы мировая статистика свидетельствует о наличии кратковременных и долговременных нестабильностей в показаниях таких приборов.

Экспериментальные данные показывают, что выход вторичных медленных электронов пропорционален поглощённой дозе в тонком, порядка пробега e , поверхностном слое металла, и поэтому существенно зависит от состояния по-

верхности. Как правило, упомянутые выше интенсиметры работают с динамическим вакуумом, т.е. в промежутках времени между сеансами работы в объём детектора напускается атмосферный воздух. Поверхность металла стремится к термодинамическому равновесию с внешней средой, и поэтому условия на поверхности заметно меняются. Наиболее слабосвязанные компоненты поверхностного слоя удаляются в первые часы работы детектора в пучке, и это приводит к кратковременным нестабильностям коэффициента вторичной эмиссии (КВЭ). Постепенно колебания КВЭ сглаживаются, и детектор выходит на рабочий режим. При этом может быть достигнута точность и стабильность мониторинга на уровне нескольких процентов. Напуск атмосферного воздуха в перерывах работы между сеансами восстанавливает на поверхности металла-эмиттера весь "набор" дефектов поверхностного слоя.

Долговременная нестабильность была обнаружена при длительном (в течение года) поддержании вакуума в объёме прибора и значительной (2×10^{19} прот/см²) экспозиции монитора под пучком. При этом не просто изменился калибровочный коэффициент, а возникла неоднородность (на уровне ~20%) по поверхности, так называемая зонная характеристика. Причина этого явления кроется, по видимому, в различной степени "выжигания" сильно связанных поверхностных структур при разной величине удельной экспозиции по поверхности эмиттера.

Известно также, что КВЭ для окислов значительно выше, чем для металлов. Отсюда следует, что в детекторах с металлическими эмиттерами чувствительность будет зависеть от наличия и толщины оксидных плёнок, а также от степени обезгаженности поверхностных слоёв. Все перечисленные выше факторы предъявляют определённые требования к технологии изготовления эмиттеров, чтобы обеспечить стабильность их характеристик. Таким образом, следует, что для полной реализации возможностей монитора вторичной эмиссии необходимо создать в его объёме глубокий статический вакуум и использовать в качестве эмиттеров "голую" металлическую поверхность, получаемую после специальной обработки, моделирующей воздействие на неё пучка. При этом можно надеяться, что удастся создать монитор, свободный от краткой и долговременной нестабильностей.

Предлагаемые в диссертации интенсиметры в виде отпаянных приборов [7, 8], изготовленные по высоковакуумной технологии в условиях Опытного производства ИФВЭ, решают большинство перечисленных выше проблемы с эмиттирующей металлической поверхностью.

Общий вид и конструкция (схематично) отпаянной камеры вторичной эмиссии для измерения интенсивности пучка частиц высоких энергий показаны на **рис. 2**. На основе (1) из нержавеющей стали на шести направляющих (2) собирается система электродов. Посредством никелевых траверс (4) электроды (5) подключаются к ножкам металлостеклянного герметичного электропровода (3). Система электродов включает 6 сигнальных (интенсивность, положение, гало), 7 штук коллекторных и электрод "запрета". Электродная система закрывается вто-

рой половиной корпуса (6), который юстируется относительно электродов с точностью $\pm 0,1$ мм. На корпусе камеры установлена манометрическая лампа (7) и малогабаритный адсорбционный насос (8). Вся сварная конструкция закрыта входным и выходным окнами из титана толщиной 50 мкм. Суммарное количество вещества, вносимого ОКВЭ в пучок, составляет 65 мг/см^2 .

В процессе производства, после длительного прогревания при $400 \text{ }^\circ\text{C}$ для обезгаживания, происходит очистка поверхностей электродов тлеющим разрядом в атмосфере аргона. При этом в результате катодного распыления происходит удаление приповерхностного слоя эмиттеров до "голового" металла. Последними операциями в производстве ОКВЭ является откачка прибора до уровня 10^{-5} Па и последующая отпайка камеры.

Часть приборов, прошедших процедуру высоковакуумной очистки, заполнялась чистым аргоном и отпайвалась. Эти приборы (ОАИК) использовались в качестве ионизационных камер для измерения более низких интенсивностей при дифракционном выводе и выводе через кристалл: 10^8 – 10^{11} прот/с.

Экспериментально измеренные характеристики ОКВЭ и ОАИК имеют типичный для эмиссионных и ионизационных приборов вид.

Абсолютные калибровки ОКВЭ с процентной точностью осуществлялись на быстром выводе по показаниям трансформатора тока, а на медленном выводе – методом активации фольг. Последний метод обеспечивает несколько худшую точность (5–8%), но может проводиться там, куда быстрый вывод пучка невозможен.

Неоценимый положительный опыт работы детекторов в экстремальных условиях получен на стенде испытаний мишеней (СИМ) [6], который позволил с помощью короткофокусной ($f \sim 1$ м) литевой линзы уменьшить размеры пучка, а значит, увеличить плотность энерговыделения примерно на порядок. Размещение оборудования и приборов диагностики пучка показано на **рис. 3**, где цифрами обозначены :

- 1 – привод мишенного узла;
- 2 и 12 – вторичноэмиссионные профилометры;
- 3 – мишень с термопарами;
- 4 и 7 – датчики (термопарные) положения пучка;
- 5 и 9 – люминесцентные экраны, просматриваемые ТВ-камерой;
- 6 – литевая линза с тороидальным трансформатором;
- 8 – железная защита;
- 10 и 13 – ОКВЭ.

На входе СИМ (на рисунке не показаны) установлены два трансформатора тока пучка, из которых первый – интегрирующий, т.е. показывает полную интенсивность БВ пучка за вывод, а второй ТТ позволяет измерять её дифференциально, т.е. для каждого отдельного банча.

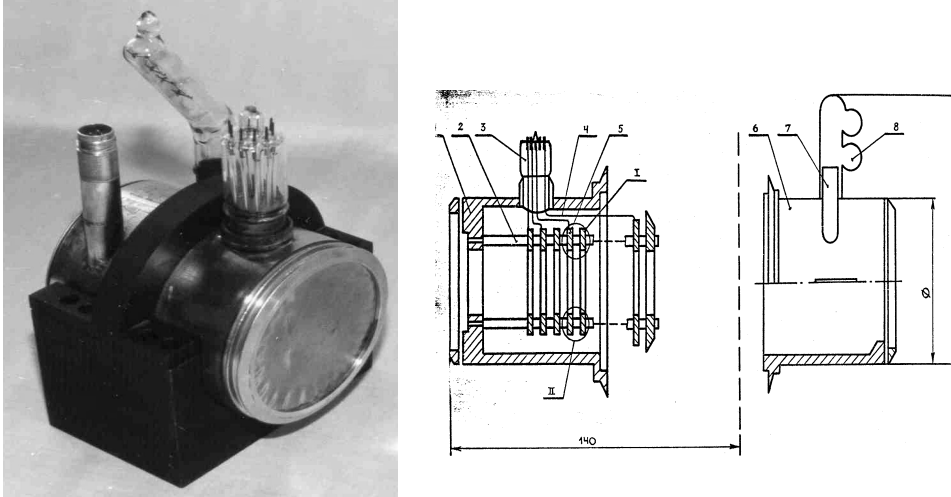


Рис. 2. Фотография общего вида и конструкция ОКВЭ.

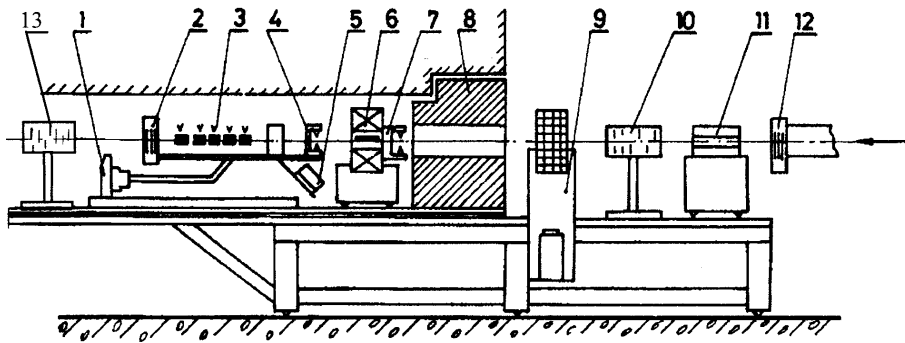


Рис. 3. Размещение оборудования установки СИМ на протонном пучке.
Названия обозначенных цифрами узлов даны в тексте.

Пионерский опыт ИФВЭ по изготовлению отпаянных вакуумных и газонаполненных приборов диагностики пучка оказался востребованным. Так, по последним данным в системах диагностики пучков ЛНС (ЦЕРН) планируется использовать несколько сотен штук отпаянных вторичноэмиссионных и около четырех тысяч единиц газонаполненных приборов, изготовленных по описанной выше ультровакуумной технологии очистки деталей.

Во второй главе представлены результаты исследований по детекторам для мониторинга потерь интенсивных пучков. Детекторы потерь, или так называемые радиационные мониторы (РМ), – необходимые приборы диагностики любого интенсивного пучка частиц высоких энергий. Размещённые на периферии апертуры, вне основного пучка, системы мониторинга потерь пучка (СМПП) из многих РМ могут стать весьма полезными инструментом контроля режимов магнитооптических элементов и нахождения возможных препятствий по трассе канала.

Накопленный мировой опыт использования СМПП позволяет сформулировать наиболее важные требования к мониторам потерь:

- чувствительность на уровне 10^6 $\text{mp}/\text{мс}$;
- динамический диапазон 4–5 порядков без эффектов насыщения;
- временное разрешение $n \times 10$ мкс ;
- идентичность характеристик различных экземпляров на уровне 10%;
- долговременная стабильность на том же уровне;
- радиационная стойкость не менее 10^6 Гр;
- простота в обслуживании большого количества однотипных детекторов;
- низкая стоимость при изготовлении и эксплуатации.

Всем этим вышеперечисленным требованиям в наибольшей степени удовлетворяет газовая ионизационная камера – радиационный монитор, оригинальная конструкция которого предложена в диссертации.

Независимо от природы и источника возникновения потерь первичного пучка частиц высоких энергий, схема их проявления одинакова и проиллюстрирована на **рис. 4**. Потерянная часть пучка под малым (в несколько миллирадиан) углом Θ входит в стенку вакуумпровода. В этом случае материал ионопровода играет роль толстой (в несколько ядерных длин) мишени. При взаимодействии частиц высоких энергий с ядрами материала ионопровода рождаются адроны, которые вызывают межъядерный каскад, а образованные от распада π^0 -мезонов γ -кванты генерируют электромагнитные ливни.

Смоделированная радиальная зависимость флюенса ионизирующих частиц вторичного излучения вне наружной стенки ионопровода при потерях протонов с энергией 70 ГэВ на преграде в канале показана на **рис. 5**. Заряженный компонент этих каскадов, распределённый в узком конусе вокруг направления потерянной части пучка (**рис. 6**), и регистрируется радиационными мониторами, расположенными на поверхности ионопровода вне вакуумного объёма канала.

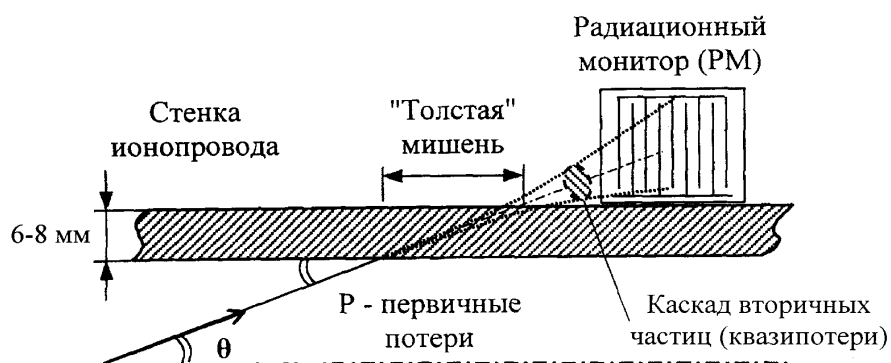


Рис. 4. Формализованная схема регистрации потерь радиационным монитором.

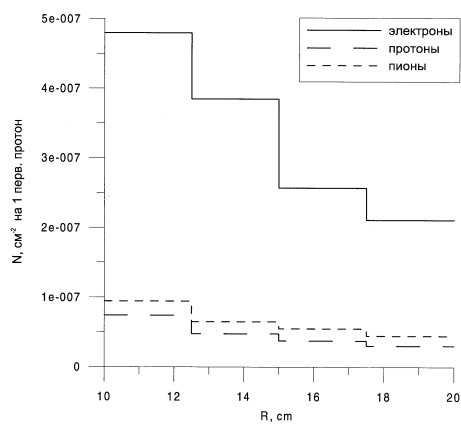


Рис. 5. Радиальная зависимость флюенса ионизирующих частиц вторичного излучения вне наружной стенки ионопровода при потерях протонов с $E_p = 70$ ГэВ на профилометре.

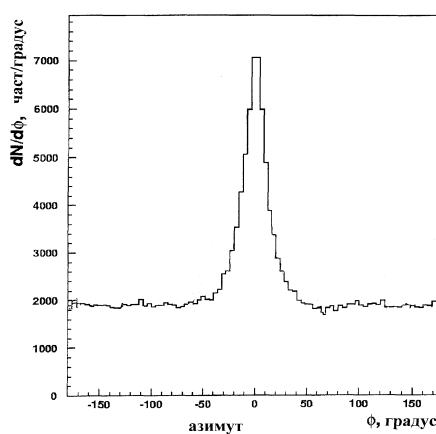


Рис. 6. Распределение фона заряженных частиц по азимуту вокруг ионопровода. Угловая координата падения пучка с $E_p = 70$ ГэВ равна 0^0 .

Эти соображения и легли в основу предложения оригинальной конструкции (в виде охватывающего вакуумпровод тора) ионизационной камеры: радиационного монитора с 2π -геометрией [9]. Тороидальные радиационные мониторы (ТРМ) были разработаны в нескольких модификациях (**рис. 7**): для различных диаметров ионопровода, разных взаимных ориентациях траекторий пучка и вектора собирающего электрического поля, в двух- и четырёхканальном исполнении камер [10]. Рабочий объём двухсекционной ТРМ на ионопровод диаметром 200 мм равен 11 дм³.

Главный недостаток тороидальных камер – ориентированность их размеров на определённый диаметр ионопровода, был преодолен в модульном радиационном мониторе (МРМ) [11], который первоначально проектировался для использования в СМПП "теплого" ускорителя первой ступени УНК. Сечения ионопровода этого ускорителя по азимуту имеют формы эллипсов или кругов с десятком разных размеров. Поэтому МРМ состоит из четырех раздвижных модулей (**рис. 8**), представляющих собой обособленные воздушные ионизационные камеры, и может монтироваться на вакуумпровод с сечением произвольной формы и размерами в интервале от 30 до 205 мм.

Электродная система МРМ изготовлена из двухстороннего (центральный) и одностороннего (боковые электроды) стандартного алюминиевого профиля марки ПВ, широко используемого в электронной промышленности в качестве радиаторов для охлаждения. Сборка электродов помещена в прямоугольный пластмассовый корпус, изготавливаемый литьём под давлением. Такая простая конструкция и технология изготовления МРМ позволила значительно снизить его стоимость в условиях мелкосерийного производства в ОЭП ИФВЭ.

Изучение характеристик РМ проводилось как путём математического моделирования методом Монте-Карло [12], так и экспериментальными измерениями [13, 14, 15]. Следует отметить, что эффективность работы и достоверность информации, получаемой от СМПП, зависит от знаний характеристик фонового излучения вокруг ионопровода как при нормальном режиме транспортировки пучка по каналу, так и при различного рода нарушениях этого режима. Наиболее типичные случаи возникновения потерь могут быть классифицированы как:

- локальные потери из-за взаимодействий с веществом преград (профилметров);
- распределённые потери из-за ошибок фокусировок квадруполями;
- локальные потери из-за неправильной трассировки дипольными магнитами;
- распределённые потери рассеивания на остаточном газе в ионопроводе.

Результаты расчётов продольного развития, на участке длиной 15 м от места установки профилометра, флюенса фоновых частиц из-за взаимодействия пучка с веществом для двух материалов детекторов (каптоновая плёнка и медная фольга) представлен на **рис. 9**. Значения флюенса на рис. 9 разделены по сортам час-

тиц и пронормированы на один протон, провзаимодействующий с веществом. При нормировке на один протон первичного пучка эти значения необходимо умножить на эффективность $8,6 \times 10^{-5}$ (каптон) и $6,5 \times 10^{-4}$ (медь). Зачернёнными точками при $Z = 4$ м отображаются значения флюенса в рабочем объёме с учётом материалов МРМ, которые усиливают развитие ливней. На соседнем **рис. 10** приведена эта же зависимость, полученная экспериментально на свободном участке канала такой же длины. Таким образом, видно достаточно хорошее согласие экспериментальных результатов с расчётными.

Другим важным результатом расчётного моделирования является вычисление плотности энерговыделения для ионизирующих компонентов излучения (в эВ/см³ на 1 первичный протон). В **табл. 2** приведено энерговыделение для электронов, пионов и протонов. Причём в двух последних строчках таблицы даны значения полных ионизационных потерь W и суммарного образуемого заряда Q , создаваемого тремя компонентами фонового излучения во всём объёме камер ТРМ и МРМ при интенсивности протонного пучка 10^{13} прот/цикл.

Таблица 2. Энерговыделение и заряд ионов в радиационных мониторах.

П а р а м е т р	Т Р М	М Р М
Электроны эВ/см ³	$70,0 \times 10^{-5}$	$139,0 \times 10^{-5}$
Пионы эВ/см ³	$34,0 \times 10^{-5}$	$22,5 \times 10^{-5}$
Протоны эВ/см ³	$20,0 \times 10^{-5}$	$23,5 \times 10^{-5}$
Полные W , эВ/ 10^{13} ppp	$14,4 \times 10^{13}$	$1,65 \times 10^{13}$
Заряд Q , нКл/ 10^{13} ppp	720	83

Продольная зависимость флюенса разных компонент фонового излучения при наклонном (~2,5 мрад) входе пучка в стенку ионопровода из-за нарушения режима работы отклоняющего магнита показано на **рис. 11**. Из этого графика можно увидеть резкую асимметрию в потоках частиц через половину РМ, находящуюся на стороне падения пучка (сектор А), и с противоположной стороны (сектор В). Это обстоятельство позволяет при необходимости использовать двухканальные РМ в качестве невозмущающих датчиков положения первичного протонного пучка. Экспериментальная кривая зависимости потерь от отклонения тока в магните нейтринного канала ИФВЭ дана на **рис. 12**. Из неё следует, в частности, что отклонение тока магнита на 25% от номинала приводит к возрастанию уровня потерь пучка на три порядка.

Модельные расчёты показывают также, что влияние двух диффузных факторов потерь значительно меньше по сравнению с рассмотренными. Интенсивность фонового излучения в продольном направлении (по оси Z) вначале растёт, а на расстоянии $Z \geq 100$ м достигает постоянного значения.

При этом число провзаимодействующих протонов на 1 м пути N_{1p} в зависимости от давления остаточного газа в вакуумпроводе P_e [Па] и интенсивности первичных протонов N_p можно выразить следующей формулой:

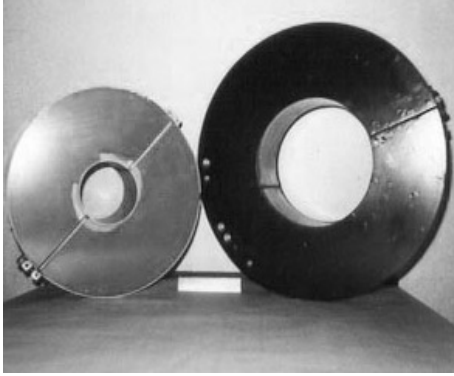


Рис. 7. Торoidalные ионизационные камеры для ионопровода $\varnothing 100$ и $\varnothing 200$ мм.

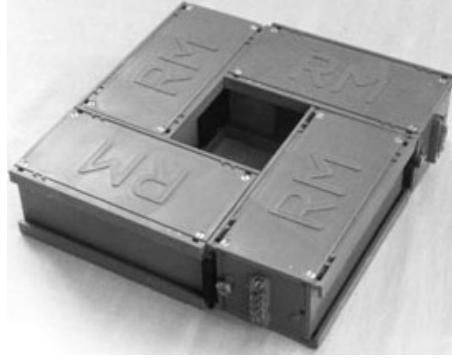


Рис. 8. Общий вид модульного радиационного монитора.

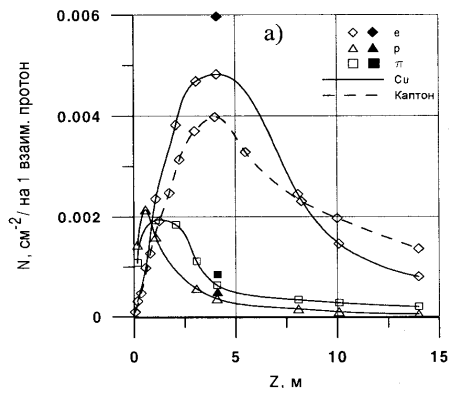


Рис. 9. Расчетная продольная зависимость флюенса фоновых частиц для двух материалов.

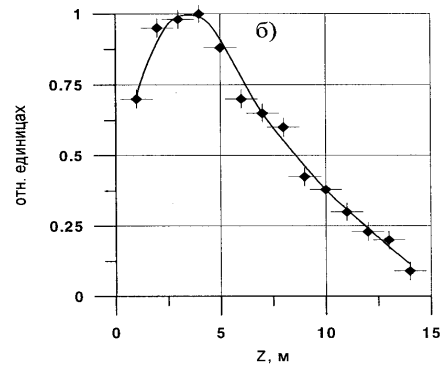


Рис. 10. Экспериментальная кривая продольной зависимости флюенса фоновых частиц.

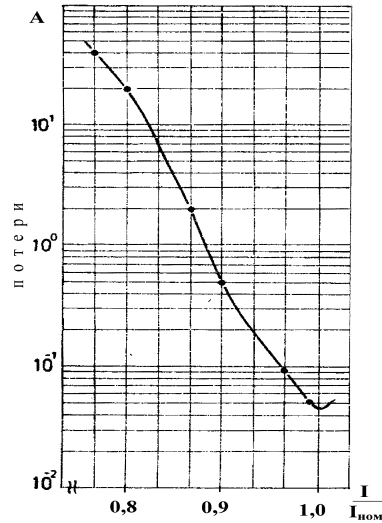
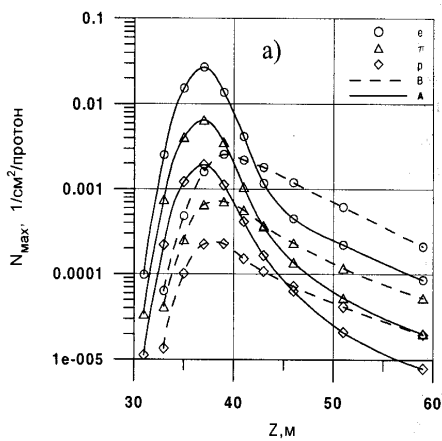


Рис. 11. Продольная зависимость флюенса разных компонент при $\theta = 2,5$ мрад. На стороне падения пучка – сектор А; на противоположной стороне – сектор Б.

Рис. 12. Зависимость амплитуды потерь от отклонения тока магнита от номинального.

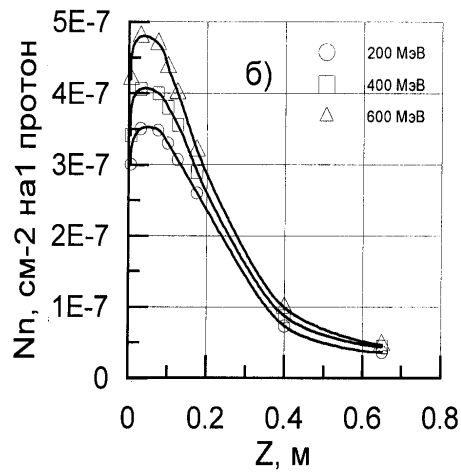
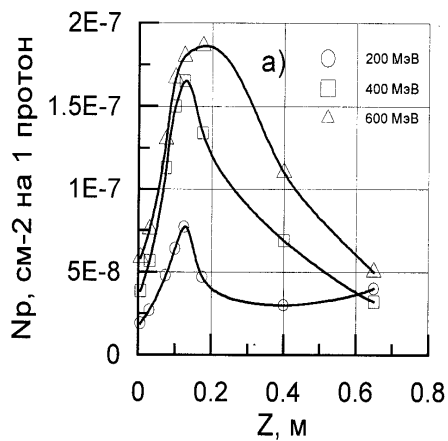


Рис. 13. Продольная зависимость флюенса протонов (а) и нейтронов (б) при потерях первичных протонов трех разных энергий на профилометрах.

$$N_{1p} = 1,34 \times 10^{-6} \times P_r \times N_p. \quad (1)$$

Похожее моделирование фоновых полей, но с поправкой на значительно более низкие энергии протонного пучка, проводилось и при создании радиационно-стойкого монитора потерь для экспериментального комплекса Московской мезонной фабрики (ММФ) ИЯИ РАН (г. Троицк). Проектная энергия ускоренных в линейном ускорителе протонов равна 600 МэВ. Средняя интенсивность тока пучка будет достигать 500 мкА. При таком высоком уровне запасённой в пучке энергии особое внимание уделяется задаче контролирования потерь [16].

В настоящее время на ММФ проводятся работы с пучками протонов с энергией 200–400 МэВ, которые также принимались в расчёт. Выведенный из ускорителя пучок транспортируется по цилиндрическому ионопроводу, изготовленному из стальных труб диаметром 200 мм и толщиной стенки 6 мм. Для контроля потерь прежде всего представляет интерес фоновое излучение снаружи вакуумпровода, которое определяется процессами взаимодействия первичных протонов с веществом, развитием межъядерного адронного каскада (АК) и ионизационными эффектами. Поскольку эти процессы протекают в комбинированной системе сред с различной геометрией и материалами, то вторичное излучение получается сложным по составу, пространственно-угловому распределению и энергетическому спектру.

В рассматриваемом диапазоне энергий наиболее значительным компонентом излучения является нуклонный, поскольку развитие АК преимущественно определяется ядерными реакциями. Налетающий протон вызывает в ядре ядерно-нуклонный каскад, в результате которого из ядра выбиваются нуклоны с относительно большой энергией. Затем из оставшегося возбуждённого ядра происходит множественное "испарение" нуклонов. Вторичные нуклоны 1-й ступени, в свою очередь, инициируют ядерные реакции и так далее... При относительно высоких энергиях протонов будут образовываться также пионы.

В ходе проведенных модельных расчётов [17] определялись характеристики нейтронного, протонного и пионного компонентов вторичного излучения на внутренней и наружной поверхностях ионопровода для перечисленных выше различных случаев потерь первичных протонов. При этом наибольший интерес представлял заряженный компонент, поскольку с его помощью предполагалось реализовать систему мониторинга потерь каналов экспериментального комплекса ММФ, а методы регистрации заряженных частиц менее сложны, чем нейтронов.

На **рис. 13** показаны результаты расчётов продольной зависимости флюенса протонной и нейтронной компонентов вторичного излучения на наружной поверхности ионопровода для энергий первичных протонов 200, 400 и 600 МэВ. Значение $Z = 0$ соответствует месту установки профилометра. Величина флюенса пронормирована на 1 протон первичного пучка. Все кривые на **рис. 14** имеют

явно выраженные максимумы, которые и следует использовать для регистрации потерь с наибольшей эффективностью. В области положения максимумов ($Z = 0,1-0,2$ м) флюенс нейтронов превышает флюенс протонов примерно в 5 раз при энергии 200 МэВ, и всего в 2,5 раза – при 600 МэВ.

Конструкция радиационного монитора потерь, разработанного для ММФ, чрезвычайно проста и представляет собой воздушную ионизационную камеру объёмом около 2 литров. Электродная система камеры с минимальной механической доработкой изготовлена из стандартного алюминиевого профиля марки ПВ. При этом центральный электрод выполнен из двухстороннего, а крайние – из одностороннего профиля. На керамических изоляторах с объёмными охраняемыми кольцами электродная система с рабочим зазором 4 мм помещается в прямоугольный алюминиевый корпус.

Радиационная стойкость прибора подразумевает способность РМ выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм как во время воздействия высоких уровней ионизирующего излучения, так и после него. В первую очередь, это относится к адекватному выбору используемых материалов. По активационным свойствам более других материалов для конструкции РМ подходит алюминий, из проката которого выполнена электродная система ионизационной камеры. Листы из сплава Амг (2,5% Mg, остальное – Al) применены для изготовления корпуса. Изоляторы выполнены из керамики М-7 (97% Al_2O_3), наведённая активность которой быстро спадает. С применением этих материалов, широко используемых в промышленности, удалось изготовить в ОЭП ИФВЭ партию технологичных, дешёвых и малоактивируемых РМ – воздушных ионизационных камер.

В третьей главе изложены результаты разработок и исследований профилометров, предназначенных для определения основных геометрических характеристик пучков: положения центров тяжести и профилей. В зависимости от диапазона интенсивности измеряемого пучка в качестве профилометров используются многоканальные камеры вторичной эмиссии (МКВЭ), ионизационные (МИК) или пропорциональные камеры (МПК), работающие в токовом (аналоговом) режиме. Независимо от типа, все детекторы работают с одной и той же унифицированной электроникой, регистрирующую основу которой составляет интегратор [18, 19] с чувствительностью 10 пКл и динамическим диапазоном 1000. Точность амплитудных измерений в каждом измерительном канале обеспечивается на уровне, лучшем 10%. Каркас предварительной электроники имеет 32 канала идентичных интеграторов и обслуживает один профилометр.

Работа в интенсивных пучках частиц высоких энергий накладывает на профилометр ряд специфических требований, главным из которых является количество вносимого в пучок вещества. Для диагностики таких пучков в ИФВЭ предложены тонкие (12 мкм) органические плёночные профилометры [20, 21], которые вносят в пучок вещества не более 5 мг/см². Сборка плёночной МКВЭ со-

держит по пучку три дюралевые рамки с полиимидной плёнкой марки ПМ-1, на которую методом напыления в вакууме через маску с определённым шагом нанесена металлизация толщиной в несколько сотен ангстрем. Каждая сигнальная плоскость, из набора унифицированных тонкоплёночных электродов, имеет апертуру 160×160 мм² с 16 полосками информационных каналов, напылённых с шагом 1,0; 2,5; 5,0; 8,0 и 10,0 мм (рис. 14).

Из-за упругих взаимодействий плёночная МКВЭ вызывает рост эмиттанса пучка с импульсом 70 ГэВ/с на уровне $\Delta\epsilon/\epsilon \sim 5 \times 10^{-5}$. В одной МКВЭ неупругие (ядерные) взаимодействия приводят к потере интенсивности $\Delta N/N \sim 7 \times 10^{-5}$.

При прохождении интенсивного пучка большой плотности происходит радиационный разогрев полиимида. Наиболее неблагоприятные условия по теплу возникают в МКВЭ, установленных в фокусах. При быстровыведенном пучке с интенсивностью 10^{13} прот/цикл и размерами $\sigma \sim 1,25$ мм скачок температуры составит $\Delta T \sim 100^\circ$, что значительно ниже допустимого кратковременного скачка температуры (400°) для полиимида, но возможно в будущем возникнут проблемы при фокусировке в пятно таких же размеров предельной проектируемой интенсивности ускорителя У-70 $\sim 5 \times 10^{13}$ прот/цикл.

Радиационная стойкость "тонкой" МКВЭ определяется ПМ плёнкой, которая, по литературным данным, сохраняет основные механические и электрические свойства при дозах до 4×10^4 Мрад. Наиболее загруженный канал №8 ИФВЭ работает в год около 3000 часов ($1,8 \times 10^6$ циклов). Максимальная достигнутая пока интенсивность составляет 10^{13} прот/цикл. Таким образом, за год (5 сеансов) через постоянно введённую в пучок МКВЭ проходит 2×10^{19} прот/год, что соответствует поглощённой дозе 5×10^4 Мрад, т.е. радиационный ресурс постоянно введённой в пучок МКВЭ расходуется приблизительно за год. Однако на практике с учётом возможности дистанционного ввода/вывода камеры в пучок реализуются более лёгкие условия: основная масса МКВЭ на каналах работает более пяти лет. К числу несомненных достоинств плёночных камер следует отнести и ничтожный уровень наведённой активности МКВЭ, что способствует проведению профилактических и ремонтных работ.

Плёночными МКВЭ оснащены все высокоинтенсивные протяжённые каналы ИФВЭ (в том числе и канал инъекции в УНК), что несомненно способствует уменьшению уровня общих потерь пучков [22, 23, 24].

Дальнейшее развитие экспериментальной базы ИФВЭ и, соответственно, сооружение новых каналов, выдвинуло задачу регистрации параметров (и в том числе вторичных) пучков более низких интенсивностей: $10^5 - 10^{10}$ прот/с. Для этих целей на основе плёночных технологий были созданы многоканальные ионизационные и пропорциональные камеры [25]. Спецификой простой конструкции этих профилометров является наличие входных и выходных мембран, выдерживающих перепад давления в одну атмосферу и позволяющих работать с газом внутри ионопровода канала. Общий вид и детали конструкции такой универсальной камеры приведены на **рис. 15**.

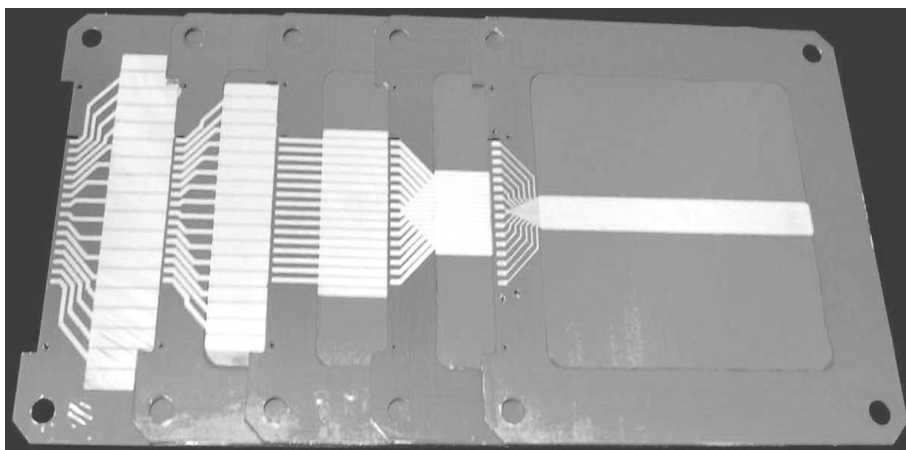


Рис. 14. Сигнальные электроды профилметров с шагом 1,0; 2,5; 5,0; 8,0 и 10,0 мм.

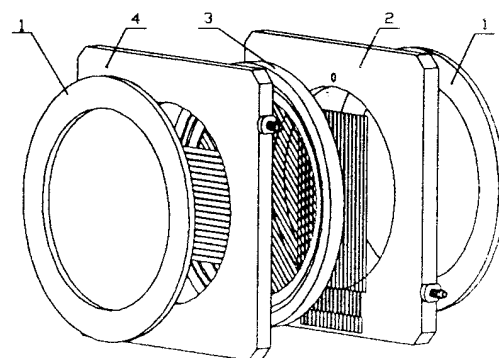
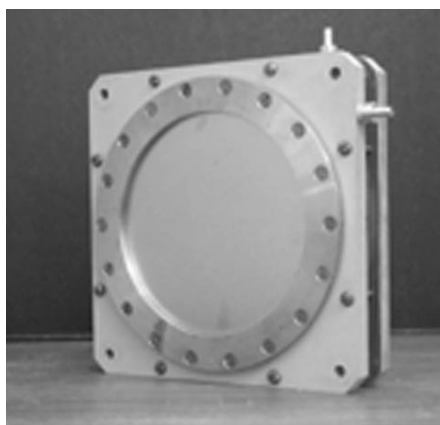


Рис. 15. Внешний вид и детали конструкции универсальной МПК с катодным съемом.

Цифрами обозначены:

1 – вакуумплотные окна;

2 и 4 – плёночные сигнальные плоскости с подводом газа;

3 – анодное кольцо с рядами из проволочек \varnothing 20 мкм.

Таким образом, в ИФВЭ создан законченный ряд плёночных профилометров пучка, работающих на трёх физических принципах: вторичной эмиссии, ионизации и пропорциональном усилении. Это позволяет, при работе с одной и той же унифицированной электроникой, измерять профили пучка в диапазоне интенсивностей 10^5 – 10^{13} част/с [26].

Опыт работы в интенсивных пучках с полиимидными плёнками позволил разработать (совместно с НПО "Пластмассы") и тонкоплёночные люминесцентные экраны [27]. Полиимидный лак в ультразвуковой установке перемешивается с откалиброванными (10 мкм) зёрнами люминофора К-67 [(Zn *Cd)S:Ag] и через калиброванную фильеру поливается на металлическую ленту. Затем лак полимеризуется и проходит термообработку. В результате описанных процессов получается тонкая полиимидная плёнка с объёмным однородным вкраплением люминофора. В настоящее время такие плёнки широко используются в телевизионных профилометрах ИФВЭ и экспериментального комплекса ИЯИ [28].

В четвёртой главе дано описание систем диагностики выведенных пучков ИФВЭ. Необходимо отметить, что процесс создания систем диагностики пучка во времени происходил параллельно с построением каналов, и их уровень на каждом текущем этапе соответствовал степени разработки и освоения микропроцессорных средств в стране и институте.

Комплексы каналов пучков 8, 21, 23 и канала 22, предназначенные для работы на внешних мишенях ускорителя У-70, являются основой экспериментальной базы ИФВЭ и обеспечивают (или обеспечивали) проведение физических исследований на установках СКАТ, "Нейтронный детектор", СФИНКС, "Кварц", СИМ, ФОДС, СПИН, КМН, ФОДС-2, СВД и др. В диссертации не рассматриваются первые, ранние версии автоматизированных подсистем диагностики пучков [29, 30], но необходимо учитывать их влияние на процесс последовательной эволюции системы.

Единая автоматизированная система диагностики пучков комплекса каналов (**рис. 16**) включает в себя шесть независимых подсистем и позволяет измерять следующие параметры [31, 32, 33, 34]:

- 1) относительное распределение потерь пучка протонов по трассам каналов в динамическом диапазоне 10^5 (начиная с 10^7 прот/цикл) в режимах БВ или МВ. При этом в режиме МВ может измеряться динамика потерь во времени с минимальным интервалом в несколько мс; всего по трассам установлено 26 штук (18 штук из которых двухканальные) РМ;
- 2) интенсивность БВ пучка в диапазоне (10^{10} – 5×10^{13}) прот/цикл с точностью лучше процента в трёх сечениях по трассе канала №8;
- 3) профили и положения центров тяжести пучков в режимах БВ и МВ, а также вторичных пучков в диапазоне интенсивностей 10^5 – 10^{13} част/цикл. Профилометры установлены в 36 сечениях комплекса каналов. В режиме МВ в неко-

- торых точках по трассе возможно многократное (до 20 раз/с) измерение профиля с вычислением положения центра тяжести пучка [35];
- 4) интенсивность классического МВ, вывода с помощью кристалла МВК или дифракционного вывода ДВ в диапазоне $10^8 - 1,3 \times 10^{13}$ протон/с с точностью несколько процентов в трёх сечениях;
 - 5) относительную эффективность взаимодействия протонного пучка с электрически изолированной мишенью канала в амплитудном диапазоне 10^5 ;
 - 6) относительное распределение интенсивности по отдельным банчам пучка при БВ с точностью $\sim 1\%$.

Система построена по двухуровневому принципу: нижний, расположенный в каналах вблизи детекторов, и верхний – в помещениях двух пультовых управления каналами. На нижнем уровне находятся детекторы пучка и головная аналоговая электроника в каркасах "Чебурашка". На верхнем – в стандарте СУММА преобразующая и управляющая электроника, автономные каркасные контроллеры со встроенной микроЭВМ на базе микропроцессорного набора К580.

Многoletний опыт эксплуатации и нескольких модернизаций системы диагностики каналов выведенных пучков показал, что требования, задачи и состав оборудования постоянно изменяются. Модульность электронной аппаратуры и микропроцессоров, выполненных в рамках магистрально-модульной системы СУММА, позволяла до определённого времени поддерживать работоспособность систем диагностики на высоком уровне. Однако в начале нового века в ИФВЭ было принято решение разработать современную версию системы диагностики пучков [36, 37].

Новая версия универсальной системы диагностики должна обладать гибкой и открытой структурой для внесения изменений, расширения набора функций и включения в её состав новых пользователей. При этом непременно должен быть учтён мировой опыт и полезные наработки, связанные с созданием подобных систем [38, 39]. К этому времени в мире выработалось единое понимание составных частей и функций так называемой "**стандартной архитектуры**" системы управления (СУ) электрофизическими установками, важной частью которых являются и системы диагностики пучков.

В зависимости от размеров и сложности стандартная модель СУ насчитывает два или три уровня. На нижнем уровне стандартной архитектуры находятся контроллеры оборудования (КО), которые встраиваются или максимально приближаются к объекту. Общая схема программно-аппаратной структуры современной построенной на базе VME-стандарта системы диагностики пучка каналов ИФВЭ показана на **рис. 17**. Её основу составляют персональные ЭВМ и крейты VME, объединённые сетью Ethernet. Возможность модификации, а не разработки новой системы, при изменении условий проведения экспериментов на этих каналах сделала стандарт VME привлекательным в этом проекте, рассчитанном на длительный срок эксплуатации.

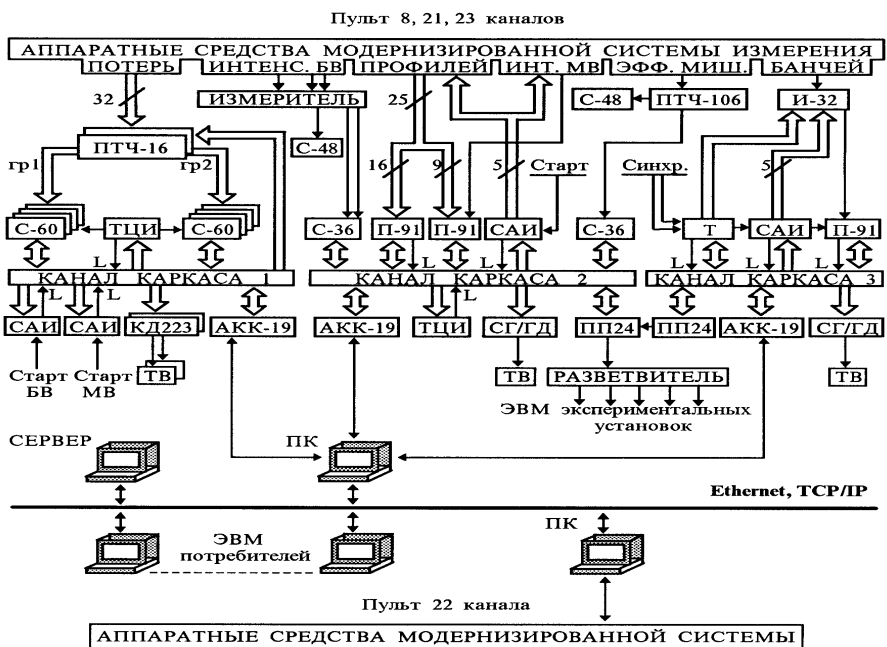


Рис. 16. Блок-схема единой системы диагностики пучка комплекса каналов.

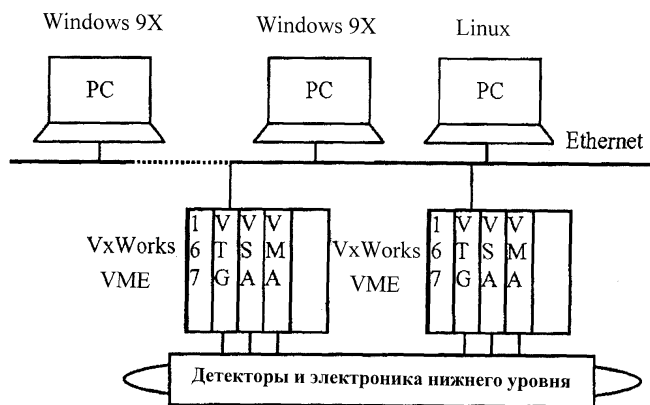


Рис. 17. Современная система диагностики пучка комплекса каналов ИФВЭ.

При разработке VME-модулей также применён унифицированный подход, суть которого заключается в общей архитектуре модулей, фиксированном распределении адресного пространства и едином назначении регистров статуса и управления. Унифицированный интерфейс этих модулей обеспечивается применением микроконтроллера и двухпортовой памяти, доступной как микроконтроллеру, так и MVME-167 – основному процессору магистрали. Алгоритмы работы реального времени системы перенесены на уровень микроконтроллера, и это значительно упрощает разработку программного обеспечения системы диагностики пучка в целом.

Операционными системами консольных персональных компьютеров на пульте каналов являются Windows 9X, а на ПК сервере – ОС Linux. Процессоры MVME-167 на шине VME работают под управлением ОС VxWorks. На уровне прикладного программного обеспечения используется специализированный для сбора данных и управления процессами программный пакет EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System). EPICS включает в себя графические приложения, необходимые для взаимодействия оператора с системой.

Образец выводимой за цикл информации о пучке в канале 8 на экране дисплея оператора показан на **рис. 18**. Информация с профилометров изображается в виде распределений пучка по двум ортогональным направлениям, с вычислениями положения центров тяжести пучка, величинами суммарного заряда и вычислением значений геометрических параметров на заранее заданном уровне распределения. Текущая интенсивность в данном цикле вывода пучка показывается в виде строки; предыдущая история интенсивности – в виде графика по циклам ускорителя. Потери пучка в сечениях канала, соответствующие номерам радиационных мониторов, индицируются в виде гистограмм с логарифмической шкалой.

Другой важной особенностью, вытекающей из использования пакета EPICS, является возможность накопления экспериментальной информации о параметрах пучка с последующей off-line её обработкой. Программа-архиватор активируется при включении Linux-сервера и работает дальше в режиме постоянного задания. Состав подлежащих архивации данных определяется оператором. Запись в архив, представляющая собой набор файлов, осуществляется при изменении данных и сопровождается временной меткой.

Возможная ближайшая модернизация системы диагностики пучка в рамках рассмотренной выше архитектуры может быть связана с использованием другого типа контроллера MVME-162, который имеет интерфейс с магистралью CAN (Controller Area Network). Локальная сеть CAN, а именно её низкоскоростная, но достаточно протяжённая (~1 км) версия, может быть использована для системы мониторинга потерь пучка. Широкая поддержка стандарта CAN ведущими производителями микросхем делает его особенно привлекательным в приложениях, рассчитанных на долгосрочную перспективу.

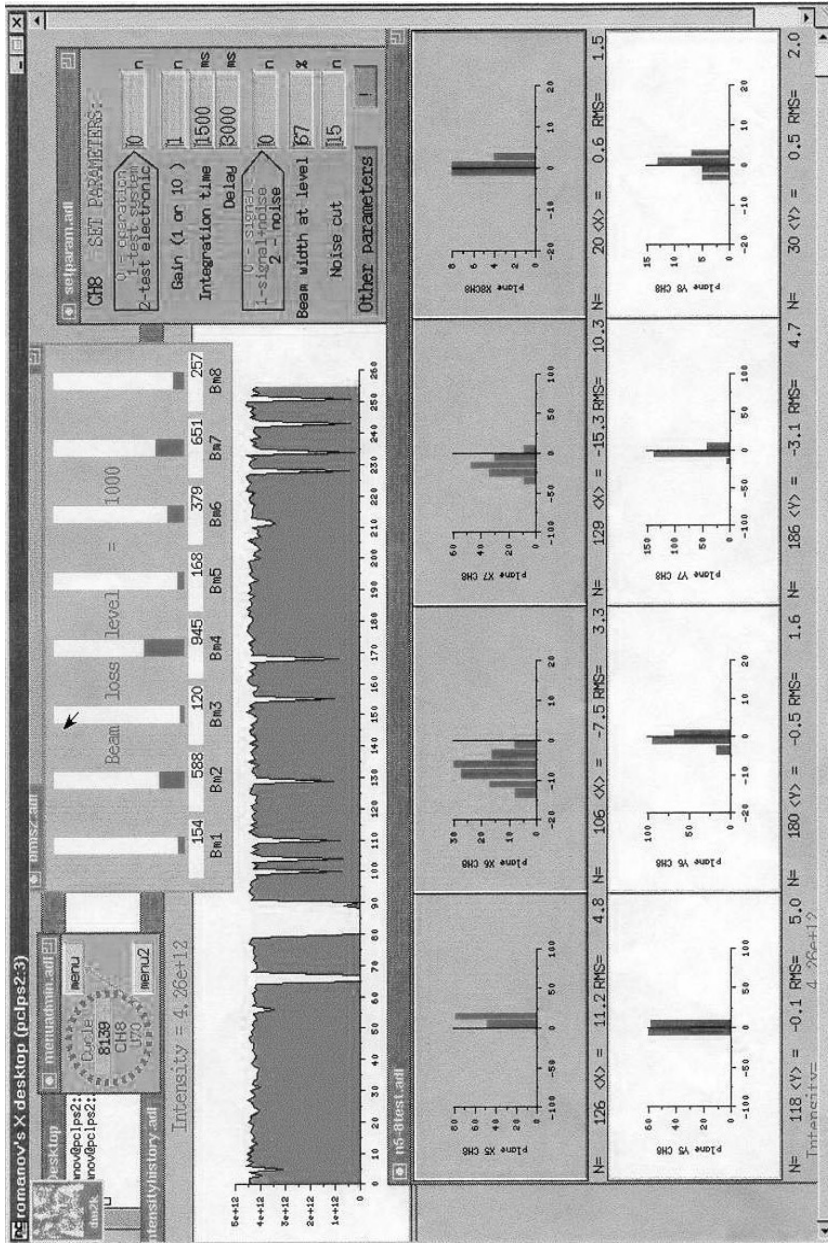


Рис. 18. Образец информации о пучке канала 8, выводимой в цикле, на дисплее оператора.

В этой же главе диссертации описаны детекторы [40] и общее построение системы диагностики пучка [41, 42] канала инъекции УНК, которые позволили в 1994 г. осуществить его физический запуск. Основными особенностями этого канала является его протяжённость, равная почти трём километрам, и размещение аппаратуры по трём технологическим зданиям. В каждом здании электронная аппаратура диагностики пучка выполнена на основе магистрально-модульной системы СУММА с микропроцессорами. Такая автономность гарантировала работоспособность отдельных (всего 6) подсистем диагностики при выходе из строя какой-либо из них.

Особого упоминания заслуживает оптический профилометр [43] канала инъекции, поскольку он тогда впервые применялся для диагностики пучка в каналах ИФВЭ. При работе канала инъекции в наладочном режиме с низкой интенсивностью оптическое изображение пучка, формируемое на тонкоплёночном люминесцентном экране, предварительно усиливается электронно-оптическим преобразователем с микроканальными пластинами и далее регистрируется приёмным устройством на основе ПЗС матрицы. Обработка информации проводилась аппаратурой и автономным каркасным контроллером, созданным в стандарте СУММА. Проведённые измерения показали, что в режиме быстрого вывода пучка чувствительность такой оптической установки находится на уровне $\sim 10^6$ прот/цикл, а пространственное разрешение – $\sim 0,15$ мм.

Специальный раздел четвёртой главы посвящён рассмотрению принципов построения системы мониторинга потерь пучка (СМПП) частиц высоких энергий. Традиционными задачами СМПП являются измерения относительного уровня потерь по азимуту и во времени путём измерения мощности дозных полей радиационными мониторами (РМ). При этом другие, но очень важные задачи диагностики пучка, такие как определение суммарных абсолютных потерь, нахождение источников потерь (их положение и интенсивность), не решены до сих пор или решаются не всегда корректно. Поэтому существующие СМПП дают скорее только качественную, а не количественную информацию. В этом разделе предлагается новый подход к созданию СМПП, основанный на использовании оригинальных РМ, рассмотренных в главе 2, и линейной модели обработки информации с них [44, 45].

При построении СМПП важно обеспечить "герметичность" системы, т.е. сделать её такой, чтобы вторичные каскадные частицы, образованные при взаимодействии первичных протонов со стенками вакуумпровода, не уходили незарегистрированными из СМПП. При этом герметичность вокруг ионпровода обеспечивается 2π -геометрией РМ, а герметичность по азимуту – правильной расстановкой РМ вдоль трассы. В соответствии с функцией отклика и желаемой эффективностью регистрации РМ, вся трасса канала может быть охвачена набором РМ без "слепых" зон. Это так называемая "полная" СМПП, герметичная по определению. Но интересно и практически важно создать герметичную систему из

конечного набора РМ, устанавливая их в наиболее критических (из соотношения величин огибающей пучка и апертур оборудования) сечениях канала.

Радиационные мониторы устанавливаются непосредственно на ионопроводе канала, чем достигается однообразие их аппаратной функции и телесного угла регистрации вторичных частиц в жёсткой части энергетического спектра. Часть рождённых вторичных частиц выходит в пространство вне ионопровода в месте образования, а другая часть захватывается в акцептанс магнитооптического канала и переносится вдоль трассы до сечения, где снова высыпается на ионопровод и т.д. Таким образом, при возникновении источника локализованных потерь в начале канала вдоль трассы может образоваться целый ряд мест, где будет повышаться доза (именно её измеряют РМ), а причиной этого являются первичные потери в начале канала. Следовательно, для того чтобы правильно локализовать и измерять интенсивность источника потерь, необходимо знать величину дозы в каждой точке и вклад в неё от предыдущих (по трассе) источников потерь.

Физическая картина распределения потерь пучка, изложенная выше, позволяет предложить и использовать в качестве простейшей математической модели СМПП линейную модель регрессии:

$$y_k(i) = y_{k0} + a_{k1}y_1(i) + \dots + a_{k,k-1}y_{k-1}(i) + v_k(i) . \quad (2)$$

Здесь $v_k(i)$ – случайные величины, определяющие погрешность измерений k -того детектора, $y_l(i)$, $l = 1, 2, \dots, k$ ($k \leq N$, N – общее количество РМ, которое имеется в нашем распоряжении), означают показания l -того детектора в i -том ($i = 1, 2, \dots, M$) выводе пучка, контролируемого СМПП.

В рамках этой модели y_{k0} определяют ту долю в показаниях k -того детектора, которая никоим образом не связана с показаниями предыдущих $k-1$ детекторов, а определяется лишь теми потерями, которые происходят исключительно на участке, контролируемом k -тым детектором. Поэтому естественно назвать y_{k0} собственными показаниями k -того детектора. Каждый из подлежащих определению коэффициентов a_{kl} отвечает за вклад в показания k -того детектора от потерь на участке, контролируемых l -тым РМ.

Принятая модель схемы измерений требует хорошей статистической обеспеченности. В тех случаях, когда число выводов пучка M при одном и том же режиме вывода достаточно велико (несколько сотен и более), для определения параметров y_k и a_{kl} можно воспользоваться методом статистического (корреляционного) анализа регрессии. При попытках использования метода наименьших квадратов (МНК) возникли существенные проблемы, связанные с взаимозависимостью переменных регрессии. Основная матрица системы (2) является плохо обусловленной, и оценки МНК становятся неэффективными, поскольку не обладают устойчивостью к малым возмущениям входных данных.

Для преодоления указанных трудностей в программе обработки экспериментальных данных на ЭВМ DEC-10 использовался метод профессора Ю.П. Пытьева, суть которого заключается в возможности корректного привлечения допол-

нительной информации об исследуемом физическом явлении. Понятие надёжности модели позволило эффективно избавляться от тех экспериментальных данных, которые, в соответствии с принятой линейной моделью, не имели отношение к исследуемому режиму работы системы вывода пучка, а являлись лишь случайными выбросами в процессе измерения.

Необходимую дополнительную информацию можно получить из рассмотрения "полных" СМПП. Предположим, что на основании априорных знаний об исследуемом процессе удалось установить, что СМПП из $L < N$, соответствующим образом расположенных детекторов потерь, позволяет проследить за результатом воздействия на неё всех возможных источников потерь. Очевидно, что для каждой такой "полной" системы в рамках, определяемых погрешностями вычислений, должна сохраняться сумма собственных показаний РМ. Поэтому при добавлении к такой системе дополнительных детекторов появляется возможность для эффективного выбора таких соотношений между искомыми параметрами, которым отвечают решения задачи (2) со сравнительно небольшими погрешностями, а сумма собственных показаний детекторов потерь (**SOD**) остаётся при этом **инвариантной**.

Экспериментальная проверка предложенной методики обработки сигналов РМ проводилась на канале № 8, транспортирующем интенсивный ($\sim 2 \times 10^{13}$ прот/цикл) пучок с импульсом 70 ГэВ/с [46]. Оптическая схема канала и места расстановки детекторов потерь (РМ) показаны на **рис. 19** (вверху). В качестве источников потерь пучка использовалось вещество профилометров (Р на рис. 19). На том же рис. 19 (внизу) в виде контуров столбцов гистограмм приведены результаты непосредственных измерений и обработанные на ЭВМ (зачёрнённые) с использованием линейной модели.

Определённый интерес представляет сравнение двух режимов: в первом случае пучок движется в практически "чистом" канале, так как все профилометры выведены из пучка; во втором – все профилометры введены, и на них происходят потери. В первом случае результаты математической обработки показывают, что распределение источников потерь протонов практически совпадает с показаниями РМ. При этом лишь ничтожная доля в показаниях РМ 3 связана с потерями на входе (РМ 1). Во втором случае распределение источников потерь и показания РМ значительно различаются. Причём результаты математической обработки говорят о наличии значительного источника потерь в зоне, контролируемой РМ 4, где располагаются два наиболее "массивных" профилометра. Заметим также, что суммарные абсолютные потери пучка (по нашим оценкам 10^{-4}) в "чистом" канале в 50 раз меньше, чем потери с введёнными профилометрами (275 мг/см^2).

Рассмотренная методика отыскания мест расположения и интенсивности источников потерь на канале №8 оказалась особенно полезной при проведении *beam-dump* эксперимента в программе нейтринных исследований ИФВЭ, поскольку такой эксперимент "сверхчувствителен" к фонам не из мишени [47].

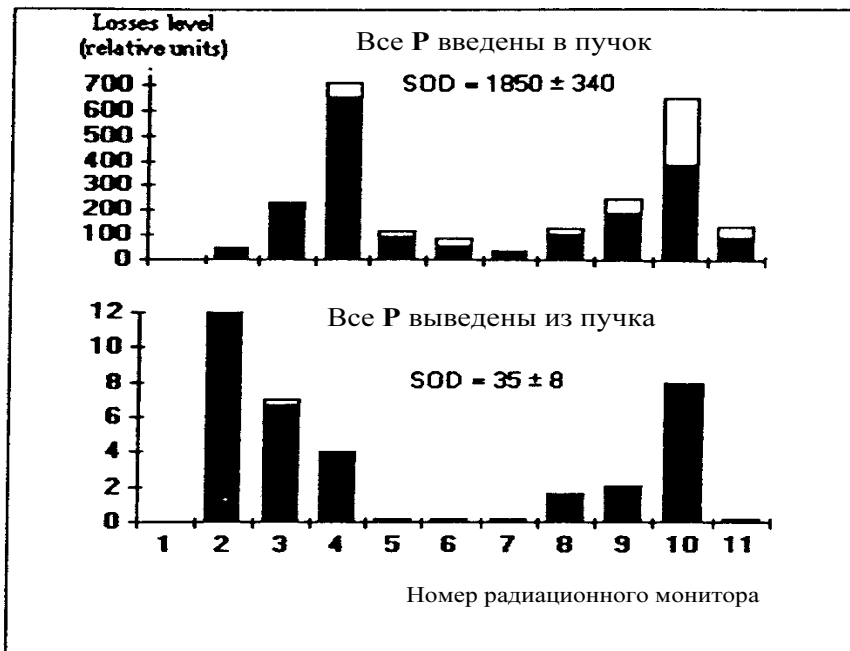
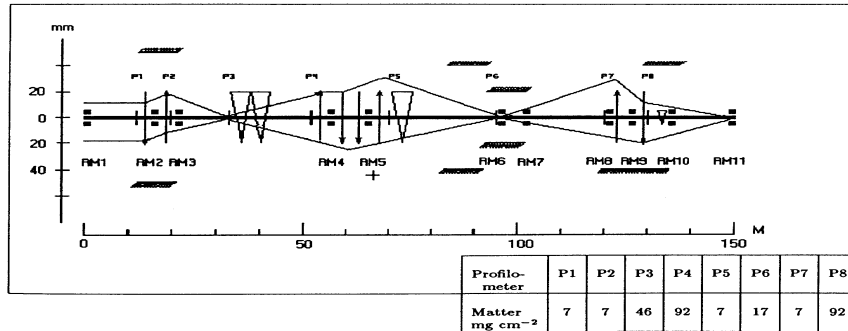


Рис. 19. Вверху: расстановка оборудования и детекторов на протонном канале. На схеме обозначены P – профилометры, RM – радиационные монитры. В таблице указано количество вещества в пучке, вносимое соответствующим профилометром. Внизу: измерения и математически обработанная (зачерненная) картина распределения потерь пучка по трассе канала при введенных и выведенных профилометрах.

В пятой главе рассматривается ряд детекторов, предназначенных для работы в ускорителях с пучками сверхвысоких энергий.

Направленный полосковый пикап для ускорителей Тэватрона

Для повышения светимости протон-антипротонных столкновений до уровня $5 \times 10^{31} \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$ в Национальной ускорительной лаборатории имени Ферми (Чикаго, США) в период 1993–99 гг. был сооружён новый ускоритель, получивший название "Главный инжектор". В 1997 г. проект "Главного инжектора" был дополнен ещё одной оригинальной машиной: так называемым "Рециркулятором". Кольцо "Рециркулятора" размещено в том же туннеле инжектора, построено на постоянных магнитах и не потребляет энергии для циркуляции антипротонного пучка. Оно позволяет ещё более (в 3–5 раз) увеличить светимость Тэватрона, "сохраняя" антипротоны, оставшиеся после столкновений, и пуская их снова "в дело".

ИФВЭ было предложено спроектировать и изготовить два пикап-электрода для протонного и антипротонного пучков "Главного инжектора". В процессе работы над первым предложением, поступило и второе: сделать подобные детекторы для антипротонов "Рециркулятора", но вакуумные условия в этом случае были на порядок более жёсткими.

После анализа требований к детектору выбор был остановлен на направленном полосковом пикапе, размещённом в трубе круглого сечения. Для плавного перехода от эллиптической формы вакуумпровода на круглую были предусмотрены специальные переходные секции с соотношением длины к диаметру как 4:1. Направленный полосковый пикап относится к классу невозмущающих пучков мониторов, а по характеру связи с пучком он – электромагнитного типа. Полосковые пикапы широко используются для измерения параметров сбанчированных пучков из-за ряда положительных качеств:

- высокая точность временной привязки;
- строгая направленность для встречных пучков;
- простота механической конструкции.

Полосковый направленный монитор состоит из двух вогнутых электродов длиной l , размещённых параллельно оси пучка, внутри круглой вакуумной камеры, волновое сопротивление относительно которой составляет 50 Ом. На обоих концах трубы смонтировано по паре вакуумных разъёмов, соединённых внутри с концами пластин-электродов, на которых регистрируются сигналы от протонных и антипротонных пучков соответственно. Так, для банча пучка с импульсом тока $I_b(t)$ напряжение на переднем (по ходу пучка) разъёме $V_{\text{уп}}$ будет

$$V_{\text{уп}}(t) = \frac{z_0}{2} \frac{60}{360} \left[I_b(t) - I_b\left(t - \frac{l}{c} - \frac{l}{c}\right) \right]$$

а на заднем разьеме V_d :

$$V_d(t) = \frac{z_0}{2} \frac{60^0}{360^0} \left[I_b(t - \frac{l}{c}) - I_b(t - \frac{l}{c}) \right] = 0$$

где c – скорость пучка, равная скорости света; $60^0/360^0$ – фактор деления полного стеночного тока на угловую ширину полосы электрода.

Поскольку проектируемые детекторы предназначались для исследовательских целей и должны были иметь хорошую чувствительность [48], то длина пластин была выбрана равной четверти длины волны ускоряющей частоты $l = 1,4$ метра.

Механическое изготовление столь длинного и прецизионного (требуемая точность $\pm 0,2$ мм) прибора представляет определённые трудности. Например, прогиб стальной пластины длиной 1,4 метра под собственным весом достигает в центре величины 1,3 мм. Положение усугубляется высокими требованиями по вакууму, что предполагает использование для обезгаживания длительного нагрева. При нагреве на 300^0C пластины с $l = 1,4$ м из нержавеющей стали (температурный коэффициент $12 \text{ мкм/м} \cdot 1^0\text{C}$) её удлинение составит 5 мм. Эти обстоятельства должны быть учтены при проектировании.

Для исключения прогибов и обеспечения возможности регулировки геометрии при подгонке положения электродов на геодезическом стенде в центре монитора введена промежуточная опора. Компенсацию температурных расширений обеспечивает пружинная подвеска на концах пластин. Герметичные вакуумные вводы имеют свободный "плавающий" электрический контакт. В конструкции монитора применены только высоковакуумные материалы: нержавеющая сталь марки 12X18Н10Т, медь М1 и в качестве изолятора – торлон.

Испытания пикапов на стендах и в реальных условиях на пучке показали, что амплитуда пика сигнала составляет 10,6 В для одиночного банча длительностью $\sigma = 3$ нс и интенсивностью 6×10^{10} протонов, двойное разделение – 10 нс. Детекторы показали и другие неплохие характеристики. На **рис. 20** приведена фотография полоскового монитора, смонтированного в туннеле Главного инжектора FNAL.

Радиационный монитор для сверхпроводящих ускорителей

Все проектируемые или сооружаемые адронные ускорители-коллайдеры на сверхвысокие энергии (УНК, SSC, LHC) обладают громадной запасённой в пучке энергией (~ 400 МДж для SSC), с одной стороны, а с другой – используют сверхпроводящие (СП) магнитные системы, режим функционирования которых очень критичен к потерям пучка и может быть аварийно прерван при весьма незначительных уровнях потерь в 1 мДж/г. Этим обстоятельством объясняются особые требования к системам мониторинга пучка (СМПП), которые призваны обеспечить саму возможность работы этих уникальных комплексов.

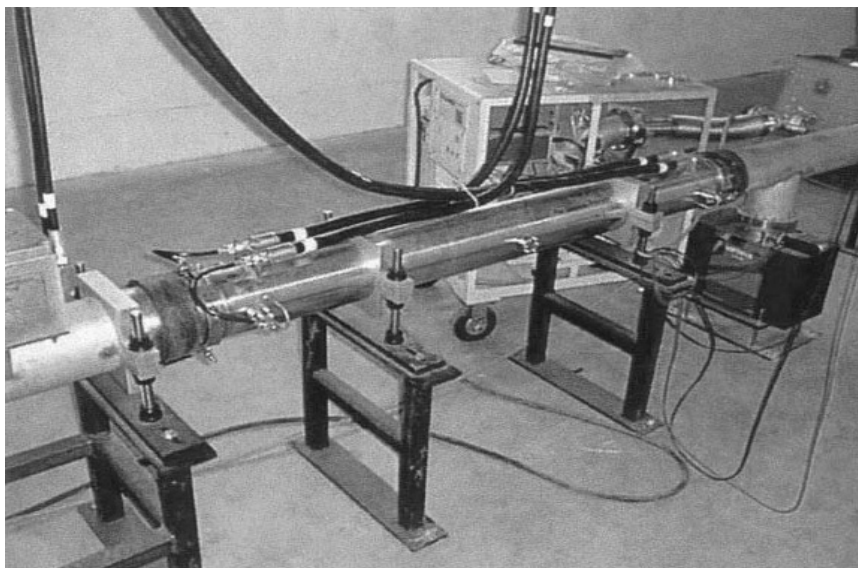
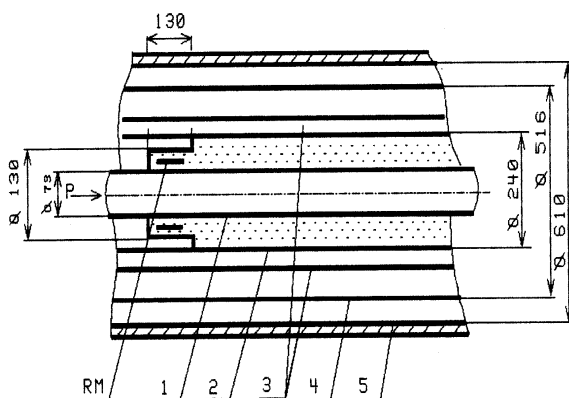


Рис. 20. Фотография полоскового монитора, смонтированного в туннеле Главного инжектора.

По природе возникновения потери пучка классифицируются на неизбежные и случайные. Неизбежные потери минимизируются и/или предусматриваются адекватные меры защиты. Обычно это узкие по апертуре, но чётко локализованные в пространстве так называемые "бутылочные горлышки".



- 1 – ионопровод;
- 2 – сосуд с жидким гелием;
- 3 – криокоммуникации;
- 4 – холодный (жидкий азот) экран;
- 5 – вакуумный сосуд криостата.

Рис. 21. Возможный вариант конструкторского решения для квадрупольного магнита УНК.

Для защиты от высоких уровней случайных потерь служат системы аварийного вывода пучка из ускорителя, запускаемые надёжной и чувствительной СМПП. Вопросы создания сверхчувствительного детектора СМПП для СП ускорителей-коллайдеров обсуждаются в этом разделе [49].

Проведённые модельные расчёты показали, что при квенче максимум энерговыделения приходится на СП-обмотку, которая является наиболее слабым местом электромагнита. Именно в ней наиболее целесообразно измерять энергетические потери от ливня, образовавшегося при взаимодействии со стенкой вакуумпровода. Для этого радиационный монитор (РМ) можно выполнить в виде цилиндрической жидкостной ионизационной камеры, в качестве рабочей среды которой используется охлаждающий электромагнит гелий [50]. Возможный вариант конструкции РМ для квадруполь УНК показан на **рис. 21**.

Расчётная чувствительность такой ионизационной камеры, названной HELIC, составляет 4 мКл/рад, т.е. в 50 раз выше, чем у предлагаемой американцами для проекта SSC аргоновой ионизационной камеры типа FNAL. Фактор лучшего размещения её относительно максимума энерговыделения даёт увеличение сигнала ещё ~ 1000 , и, наконец, объём гелиевой камеры (0,8 литра) почти на порядок больше аргоновой. Таким образом, ожидаемый сигнал HELIC при 1/40 "квенчевого" потока частиц составляет величину $\sim 10^{-9}$ Кл, и возможно его надёжное измерение.

Временные характеристики жидкогелиевой ионизационной камеры определяются подвижностями заряженных доменов. Они не высоки (~ 1 мс при 4,2 К; $E = 1$ кВ/мм и межэлектродном зазоре 3 мм), но вполне достаточные, чтобы обеспечить прерывание развития квенча в сверхпроводнике, характерное время развития которого составляет 20 мс. HELIC имеет уникальные расчётные характеристики и по режекции сигналов от "своего" и соседнего колец. Так, в условиях туннеля УНК, когда расстояние между кольцами первой (400 ГэВ) и второй (3 ТэВ) ступеней составляет 1,2 м, избирательная способность РМ такого типа оказывается на уровне 50 дБ.

В данном разделе очерчены лишь основные контуры монитора для контроля потерь в сверхпроводящих ускорителях-коллайдерах, и предстоит решить ещё ряд вопросов при его практической реализации. Однако, как нам кажется сегодня, для СП ускорителей с "холодным" железом не существует альтернативных способов диагностики пучка, которые позволили бы детектировать раннее развитие потерь пучка на уровнях, предупреждающих развитие квенча. Следует подчеркнуть также, что для реализации такого детектора необходимо уже на стадии проектирования СП магнитооптических элементов закладывать РМ, размещённые в непосредственной близости к ионопроводу и использующие в качестве рабочей среды криоагент. Радиационные мониторы описанного здесь типа должны стать неотъемлемыми частями СП квадруполь по аналогии с пикап-электродами для измерения положения орбиты.

Мониторы синхротронного излучения для ускорителей ДЕЗИ

Коллайдер ГЕРА представляет из себя двойное кольцо длиной 6,3 км, расположенное на территории ДЕЗИ, Гамбург (Германия). Протонные и электронные (позитронные) пучки ускоряются во встречных направлениях до 820 и 27,5 ГэВ соответственно и взаимодействуют в двух точках пересечения (IP) в северном и южном залах. В течение ряда лет (с момента запуска в 1992 г.) и до 1997 г. светимость машины неуклонно увеличивалась, достигнув величины $1,4 \times 10^{31} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что очень близко к проектной величине. Дальнейшее увеличение светимости могло быть достигнуто только лишь за счёт уменьшения поперечных размеров сталкивающихся пучков.

Соответствующий проект увеличения светимости в 4,7 раза был одобрен, и намечены меры по его реализации. Согласно этому проекту, наряду с другими мероприятиями, для уменьшения эмиттанса $e^{+/-}$ пучков запланирована установка новой сверхпроводящей ФОДО ячейки. Сведение и отвод пучков в районе IP осуществляется за счёт соответствующих отклонений лептонных пучков. В выбранной геометрии при полном угле отклонения лептонного пучка в 8,6 мрад и его максимальном токе 58 мА полная мощность сопутствующего рентгеновского синхротронного излучения (СИ) составит величину 26 кВт для каждого пересечения.

Контроль за геометрией прохождения лептонного пучка через сверхпроводящие элементы перед IP должен был осуществляться по положению и форме СИ. Для этого в специальном канале СИ в 24 метрах от IP установлен монитор синхротронного излучения (МСИ), спроектированный и изготовленный в ИФВЭ.

Работа МСИ основана на регистрации величин фототоков при поперечном прецизионном сканировании. Основные трудности в разработке МСИ были связаны с размещением прибора в стеснённых условиях и невозможностью применения в связи с этим искусственного охлаждения измерительной головки.

Выполненные тепловые расчёты и цикл экспериментальных исследований на макетах МСИ в пучке накопителя ДОРИС (мощность СИ ~24 кВт) позволили создать такую конструкцию измерительной головки, которая выдерживает столь высокие тепловые нагрузки (**рис. 22**). Она имеет пять вертикально расположенных вольфрамовых фольг толщиной 100 мкм, которые служат в качестве сигнальных пальцев-электродов. В свою очередь, сигнальные пальцы (катоды) разделены более протяжёнными по пучку, но такой же толщины, фольговыми электродами смещения (анодами). Вся электродная система измерительной головки смонтирована на изоляционной пластинке из слюдоситалла. Для прецизионного (20 мкм) перемещения в сверхвысоком вакууме (10^{-11} тор) в пределах 25 мм применены механизмы линейного перемещения фирмы Vacuum Generators с шаговым двигателем и оптическим датчиком угол-код.

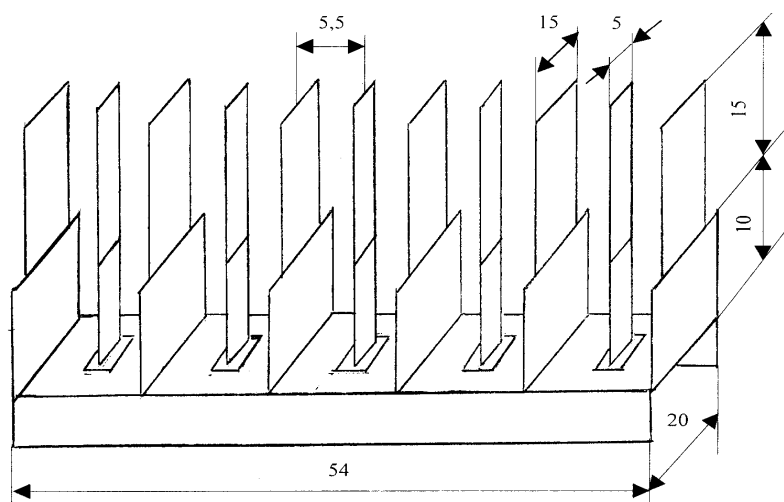


Рис. 22. Структура измерительной головки монитора СИ.

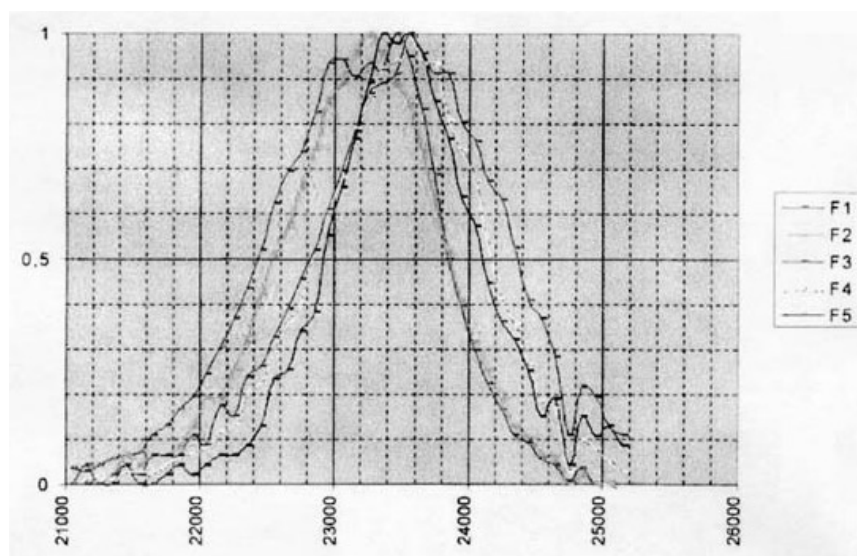


Рис. 23. Профили пучка синхротронного излучения от накопителя ДОРИС по разным каналам измерительной головки.

На **рис. 23** представлены профили синхротронного излучения пучка накопителя ДОРИС, измеренные по фототоку с каждого из пяти пальцев-электродов, при поперечном сканировании в вертикальном направлении.

В заключении перечислены основные полученные результаты и выводы диссертационной работы.

Главным итогом диссертационной работы является обеспечение программы экспериментальных исследований ИФВЭ по физике частиц высоких энергий, а также разработка ряда приборов диагностики пучка для других физических центров. Основные научные и практические результаты, вошедшие в диссертацию, могут быть кратко сформулированы следующим образом:

1. Сформулированы наиболее важные требования к детекторам диагностики пучков заряженных частиц высоких энергий. Созданы унифицированные и надёжные приборы для основных систем диагностики выведенных пучков, в частности:

- отпаянные камеры для измерения квазипостоянных пучков в широком диапазоне интенсивности. Главными достоинствами таких интенсиметров являются их компактность, стабильность характеристик и удобства абсолютных калибровок;
- тонкоплёночные многоканальные профилометры и универсальные, в вакуумном исполнении, приборы, работающие на трёх различных физических принципах: вторичной эмиссии; ионизации газов и газовом усилении. Это позволило профилометрам работать при любой интенсивности пучков с унифицированной в ИФВЭ головной электроникой;

Полная проработка конструкторской и технологической документации на эти детекторы позволила организовать их мелкосерийное изготовление в опытном производстве Института.

2. Предложена формализованная схема мониторинга потерь интенсивных пучков высоких энергий. Изобретён радиационный монитор с квази-2π-геометрией, предназначенный для реализации этой схемы. Разработана линейная модель "герметичной" системы мониторинга потерь интенсивного пучка. Проведена практическая апробация модели на наиболее интенсивном канале выведенных пучков ускорителя У-70.

3. Разработан ряд детекторов для работы в тяжёлых температурных и радиационных условиях в ИФВЭ и Экспериментальном комплексе Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН (г. Троицк).

4. Созданы (совместно с сотрудниками НПО "Пластмассы") "тонкие", на полиимидной основе, сцинтиллирующие плёнки. Оптические профилометры для задач диагностики пучка внедрены в ИФВЭ и ИЯИ.

5. Реализованы системы диагностики выведенных пучков ИФВЭ и в том числе канала инжекции в УНК, а также экспериментального комплекса ММФ.

6. Предложен сверхчувствительный радиационный монитор потерь для сверхпроводящих ускорителей, позволяющий избежать квенчей, обусловленных потерями пучка. Значительное увеличение чувствительности, по сравнению с газовой ионизационной камерой, достигается за счёт размещения монитора в максимуме адронного ливня и использовании жидкого гелия в качестве рабочего вещества детектора.
7. Разработаны прецизионные полосковые пикап-электроды для диагностики циркулирующих во встречных направлениях протонных и антипротонных пучков "Главного инжектора" и "Рециркулятора" ФНАЛ (США).
8. Созданы прецизионные мониторы синхротронного излучения накопителя ДОРИС и коллайдера ГЕРА для ДЕЗИ (Германия).

Список литературы

1. Бушнин Ю.Б., Говорун В.Н., Давыденко Ю.П., Данцевич Г.А., Дунайцев А.Ф., Екимов Ан. В., Лапицкий С.Н., Селезнев В.С., Терехов В.И. *Автоматизированная система для измерения параметров выведенных пучков 70-ГэВ ускорителя*. В сборнике «Второй Всесоюзный семинар по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях», Новосибирск, 1982, стр. 96-98.
2. Гвахария Т.В., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Дунайцев А.Ф., Лапицкий С.Н., Селезнев В.С., Сенько В.А., Солодовник Ф.М., Терехов В.И. *Унифицированные средства диагностики выведенных протонных пучков на каналах ИФВЭ*. В сборнике «Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц», Дубна, 1985, т.1, стр. 253-255.
3. Галяев Н.А., Давыденко Ю.П., Данцевич Г.А., Дунайцев А.Ф., Макаров Г.П., Мокроусов В.А., Лапицкий С.Н., Селезнев В.С., Сенько В.А. *Комплекс аппаратуры для измерения потерь на трассах выведенных протонных пучков ускорителя ИФВЭ*. В сборнике «XI International Symposium on nuclear electrons» Bratislava, Czechoslovakia, 1983 рХII/87.
4. Маконин С.В., Петренко С.В., Селезнёв В.С., Терехов В.И. *Широкодиапазонный измеритель интенсивности пучка Серпуховского ускорителя*. Препринт ИФВЭ 86-180, Серпухов, 1986; Приборы и техника эксперимента, №3, Москва, 1988, стр.26-29.
5. Гоцев В.В., Маконин С.В., Петренко С.В., Селезнёв В.С. и др. *Измеритель относительного распределения интенсивности пучка по банчам при быстром выводе*. Препринт ИФВЭ 89-19, Серпухов, 1989.
6. Алферов В.Н., Баянов Б.Ф., Гусак А.А., Евтихийев А.В., Кузьменко В.Г., Новиков В.П., Осипов Э.В., Романов Ю.А., Самарин М.А., Селез-

- нёв В.С., Серга Е.В., Серебряков Б.А., Соловьёв В.Е., Терехов В.И., Ходырев Ю. *Установка для исследования мишеней, облучаемых протонным пучком высокой плотности*. Препринт ИФВЭ 85-132, Серпухов, 1985.
7. Lapitsky S.N., Rakhmatov V.E., Seleznev V.S. *The Sealed Beam Intensity Monitors*. In "Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference", Berlin, Germany, 1992, vol. 2, p 1106-1108.
 8. Афонин А.Г., Галяев Н.А., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Дианов В.И., Дышкант А.С., Запольский В.Н., Котов В.И., Крючков В.П., Лапицкий С.Н., Лебедев В.Н., Максимов А.В., Минченко А.В., Мойбенко А.Н., Селезнев В.С., Суляев Р.М., Терехов В.И., Холоденко М.А., Чёрный С.А., Чесноков Ю.А. *Универсальный высокоинтенсивный канал пучков частиц на ускорителе ИФВЭ (канал 22)*. Препринт ИФВЭ 90-38, Протвино, 1990.
 9. Лапицкий С.Н., Селезнёв В.С. *Устройство для контроля потерь пучка ускоренных заряженных частиц высоких энергий*. Авторское свидетельство № 1829884 от 13 октября 1992 г.
 10. Lapitsky S.N., Kurochkin I.A., Mokhov N.V., Seleznev V.S. *The Concept of Beam Loss Monitor Design and their Implementation at IHEP*. In "Proceedings of the XV International Conference on High Energy Accelerators", Hamburg, Germany, 1992, pp 242-244.
 11. Seleznev V., Khodyrev Yu., Krouptchenkov I., Lomakin E., Sytin A. *Loss Monitoring of 70 GeV Proton Beam*. In "Proceedings of the Eighth European Particle Accelerator Conference", Paris, France, 2002, pp 1972-1974.
 12. Крупченков И.В., Ломакин Е.Н., Селезнёв В.С., Сытин А.Н., Ходырев Ю.С. *Исследование характеристик фонового излучения для мониторинга потерь в канале транспортировки протонного пучка с энергией 70 ГэВ*. В кн. "XVIII Совещание по ускорителям заряженных частиц", Обнинск, Россия, 2002.
 13. Lapitsky S.N., Kurochkin I.A., Seleznev V.S. *Development and Investigation of the 2 π Beam Loss Monitors for Super-High Energy Accelerators*. In "Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference", Washington, USA, vol 3, pp 2190-2192.
 14. Афонин А.Г., Галяев Н.А., Давыденко Ю.П., Калайдов А.В., Лапицкий С.Н., Мойбенко А.Н., Петренко С.В., Рзаев Р.А., Селезнёв В.С., Сенько В.А., Солодовник Ф.М., Сытин А.Н., Терехов В.И., Чесноков Ю.А., Филимонов Б.Б. *Система измерения потерь пучка канала № 8*. Препринт ИФВЭ 89-128, Серпухов, 1989.
 15. Афонин А.Г., Бритвич Г.И., Галяев Н.А., Давыденко Ю.П., Запольский В.Н., Курнаев О.В., Лапицкий С.Н., Лебедев В.Н., Минченко А.В., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Рзаев Р.А., Сахаров В.П., Селезнёв В.С., Терехов В.И., Чепегин В.Н., Чесноков Ю.А. *Возможности*

- систем быстрого вывода и транспортировки высокоинтенсивного пучка протонов на мишень нейтринного канала. Препринт ИФВЭ 86-3, Серпухов, 1986.*
16. Gorbunov V., Gratchev M., Seleznev V., Yabzhanov V. *The MMF Experimental Area Control System: Proton Beams Diagnostics and Upgrading Control of Magnet Power Supplies*. In "European Particle Accelerator Conference", FRP35F, London, UK, 1994, p 181.
 17. Давыденко Ю.П., Крупченков И.В., Ломакин Е.Н., Селезнёв В.С., Ходырев Ю.С. *Регистрация потерь протонов с энергией 200-600 МэВ*. В сборнике "XVII Совершеннолетие по ускорителям заряженных частиц", Протвино, Россия, 2000, том 1, стр. 220-224.
 18. Бушнин Ю.Б., Селезнёв В.С., Терехов В.И. *Интеграторы пико- и наноамперных токов*. Препринт ИФВЭ 83-103, Серпухов, 1983.
 19. Бушнин Ю.Б., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Денисов А.С., Желамков А., Иванов Ю.М., Ивочкин В.Т., Лапицкий С.Н., Рзаев Р.А., Сахаров В.П., Селезнёв В.С., Смирнов А.И., Суворов В.М., Терехов В.И. *Формирование и диагностика протонного пучка на установку "КВАРЦ" в режиме медленного вывода*. Препринт ИФВЭ 82-130, Серпухов, 1982.
 20. Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Лапицкий С.Н., Покровский К., Рахматов В.Е., Селезнёв В.С., Терехов В.И. *"Тонкая" камера для измерения профилей интенсивных пучков заряженных частиц высоких энергий*. Приборы и техника эксперимента, №3, Москва, 1985, стр. 27-29.
 21. Акопян М.В., Баталов А.А., Бугорский А.П., Галяев Н.А., Горин Ю.П., Гресь В.Н., Денисов С.П., Давыденко Ю.П., Запольский В.Н., Зеленин В.Е., Краснокутский Р.Н., Крючков В.П., Корягин А.С., Котов В.И., Кочетков В.И., Курбаков В.И., Лапицкий С.Н., Лебедев А.А., Медведь С.А., Михайлов В.С., Михайлов Ю.В., Мохов Н.В., Пищальников Ю.М., Рзаев Р.А., Селезнёв В.С., Солдатов А.П., Стоянова Д.А., Терехов В.И., Узунян А.В., Чесноков Ю.А., Шувалов Р.С. *Адронный канал №23 комплекса меченых нейтрино*. Препринт ИФВЭ 86-129, Серпухов, 1986.
 22. Галяев Н.А., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Данцевич Г.А., Лапицкий С.Н., Селезнёв В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Терехов В.И., Чесноков Ю.А. *Система измерения профилей пучка на протяжённой трассе канала транспортировки заряженных частиц*. Препринт ИФВЭ 85-61, Серпухов, 1985.
 23. Баталов А.А., Ветлицкий И.А., Галяев Н.А., Гресь В.Н., Гришкин Ю.Л., Давыденко Ю.П., Дуденко В.В., Зайцев А.М., Запольский В.Н., Зеленин В.Е., Котов В.И., Кубаровский В.П., Ландсберг Л.Г., Лапицкий С.Н., Лебедев В.Н., Ломкаци Г.С., Пичугин В.А., Погорелко О.И., Рзаев Р.А., Сахаров В.П., Селезнёв В.С., Смолянкин В.Т., Терехов В.И., Чёрный С., Чесноков Ю.А. *Универсальный канал пучков частиц для установки СФИИКС на ускорителе ИФВЭ*. Препринт ИФВЭ 87-116, Серпухов.

24. Баранов В.Т., Губриенко К.И., Гуров Г.Г., Кирочкин Ю.И., Курнаев О, Меркер Э.А., Мызников К.П., Рогозинский В.Г, Селезнёв В.С., Татаренко В.М., Терехов В.И., Федотов Ю.С. *Система инжекции УНК*. Препринт ИФВЭ 92-118, Протвино, 1992.
25. Gres V.N., Seleznev V.S., Solodovnik F.M. *Wide-range High-Sensitive Chamber to Measure Beam Profiles*. In "Proceedings of the Second European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators. DESY M-9507, Hamburg, Germany, 1995.
26. Бирюков В.М., Гресь В.Н., Иванов А.А., Котов В.И., Селезнёв В.С., Тараканов М.В., Терехов В.И., Царик С.В., Чесноков Ю.А. *Канал транспортировки частиц высоких энергий, основанный на применении изогнутого монокристалла*. In "Proceedings of the Particle Accelerator Conference PAC 95" Dallas, USA, vol 3, p 1948.
27. Агапов О.А., Лапицкий С.Н., Муравьёв В.Е., Никитенко Б.А., Селезнёв В.С., Сербин В.В. *Плёночные люминесцентные экраны. Приборы и техника эксперимента, №2, 1992, стр. 107-109; Instruments and Experimental Techniques, vol. 35, No 2, part 1, 1992, Consultants Bureau, New York, USA.*
28. Seleznev V., Solodovnik F., Vrazhnov M., Wittenburg K. *Processing the Information Received by Matrix Beam Detectors*. In "Proceeding of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems", Trieste, Italy, 1999, pp 72-74.
29. Алферов В.Н., Дунайцев А.Ф., Комаров В.В., Селезнёв В.С., Соловьёв В.Е., Тишин В.Г. *Системы автоматизированного управления ускорительным комплексом ИФВЭ*. В сборнике "IV Всесоюзный семинар по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях", Протвино, 1986, стр. 11-14.
30. Алферов В.Н., Ветров П.Б., Давыденко Ю.П., Кузнецов В.С., Любимова Е.Н., Мойбенко А.Н., Петренко С.В., Селезнёв В.С., Соловьёв В.Е., Терехов В.И., Трушин К.И. *Распределённая система управления каналами частиц*. В сборнике "Обработка физической информации", ЦНИИ Атоминформ, Ереван, 1988, стр.98-100.
31. Гоцев В.В., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Дунайцев А.Ф., Лапицкий С., Маконин С.В., Петренко С.В., Романов И.И., Романьков В.М., Селезнёв В.С., Сенько В.А., Сытин А.Н., Терехов В.И. *Система диагностики выведенных протонных пучков ускорителя ИФВЭ*. Препринт ИФВЭ 88- 106, Серпухов, 1988.
32. Давыденко Ю.П., Селезнёв В.С., Солодовник Ф.М. *Программное обеспечение модернизированной системы диагностики пучка каналов выведенных пучков ускорителя ИФВЭ*. В сборнике "XV Совецание по ускорителям заряженных частиц", Протвино, 1996, том 1, стр. 316-320.

33. Афонин А.Г., Давыденко Ю.П., Мамаков П.В., Осипов Э.В., Селезнёв В., Соколов С.В., Трушин К.И. *Система обмена информацией на базе последовательной магистрали СУММА*. Препринт ИФВЭ 86-13, Серпухов.
34. Гоцев В.В., Давыденко Ю.П., Маконин С.В., Петренко С.В., Романьков В.М., Селезнёв В.С., Солодовник Ф.М., Терехов В.И. *Электронные модули для системы диагностики пучков частиц*. Препринт ИФВЭ 90-12, Протвино, 1990.
35. Давыденко Ю.П., Романьков В.М., Селезнёв В.С., Терехов В.И. *Многократное измерение профиля пучка протонов при медленном выводе из синхротрона на 70 ГэВ*. Приборы и техника эксперимента, №4, Москва, 1991, стр. 40-43.
36. Иванова Н.С., Ковальцов В.И., Кошелев А.В., Лукьянцев А.Ф., Матюшин А.А., Милюткин В.П., Романов И.И., Селезнёв В.С., Сытин А.Н., Клаузен М. *Модернизация системы диагностики каналов транспортировки выведенных пучков частиц У-70*. В сборнике "Труды XVIII Совещания по ускорителям заряженных частиц", Обнинск, Россия, 2002.
37. Kovaltsov V., Loukiantsev A., Matyushin A., Milyutkin V., Romanov I., Seleznev V., Sytin A., Clausen M. *Upgrading of Beam Diagnostic System of U-70 Beam Transfer Lines*. In "Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems", Trieste, Italy, 1999, pp 72-74.
38. Alferov V.N., Dunaitsev A.F., Komarov V.V., Lukyantsev A.F., Seleznev V.S., Solov'ev V.E. *The UNK Control System. Basic principles*. In "Proceedings of Europhysics Conference on Control Systems for Experimental Physics", CERN 90-08, Geneva, Switzerland, 1990, p 90.
39. Агеев А.И., Алферов В.Н., Бардик Ю.И., Ветров П.Б., Воеводин В.П., Голобородько С.Г., Гоцев В.В., Гресь В.Н., Дунайцев А.Ф., Жарков Е.А., Закамский Л.Л., Зелепукин С.А., Елин А.П., Изгаршев С.В., Калистратов Е.Н., Ким Л.А., Комаров В.В., Копылов Л.И., Коробов В.Н., Ковальцов В.И., Кренделев В.А., Кузьменко В.Г., Лапицкий С.Н., Лобов И.В., Лукьянцев А.Ф., Матюшин А.А., Меркер Э.А., Михеев М.С., Момот В., Мухин С.А., Обухов Г.А., Орёл О.В., Попов А.В., Селезнёв В.С., Соловьёв В.Е., Сытин А.Н., Терехов В.И., Углеков В.Я., Щербаков Е.Д., Койпер Б., Перриолла Ф. *Состояние работ по системе управления УНК*. В сборнике "XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц", Протвино, Россия, 1994, том 2, стр. 152-162.
40. Merker E.A., Seleznev V.S. *Beam Diagnostics in the UNK*. In "Proceedings of the Workshop on Advanced Beam Instrumentation", KEK, Tsukuba, Japan, 1991, vol 1, pp 96-104.
41. Баранов В.Т., Герасимов А.П., Гоцев В.В., Гресь В.Н., Дунайцев А.Ф., Ким Л.А., Комаров В.В., Крупченков И.В., Лапицкий С.Н., Леонов А.П.,

- Логинов А.А., Матвеев М.Ю., Меркер Э.А., Никитенко Б.А., Петренко С.В., Романов И.И., Селезнёв В.С., Солодовник Ф.М., Сытин А.Н., Терехов В.И. *Диагностика пучка в канале инжекции УНК*. В сборнике "XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц", Протвино, Россия, 1994, том 2, стр. 125-131.
42. Gotsev V., Gres V., Dunaitsev A., Kim L., Komarov V., Lapitsky S., Matveev M., Seleznev V., Solodovik F., Sytin A., Terekhov V. *Controlling the UNK transfer line beam diagnostics*. Nuclear Instruments and Methods, A 352 (1994), pp 199-200.
 43. Давыденко Ю.П., Жмулёв Л.С., Никитенко Б.А., Петренко С.В., Рыбин С.И., Селезнёв В.С. и др. *Система оцифровки оптического изображения пучка*. Препринт ИФВЭ 89-207, Серпухов, 1989.
 44. Lapitsky S.N., Lukyantsev A.F., Seleznev V.S., Shevtsov P.V., Tomin S.I. *Possible Approach to Creation of Systems for High Energy Proton Beam Losses Measurements (part 1. Physical Aspects and Experimental Results)*. In "Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference", Berlin, Germany, 1992, vol 2, pp 1052-1054.
 45. Lapitsky S.N., Lukyantsev A.F., Seleznev V.S., Shevtsov P.V., Tomin S.I. *Possible Approach to Creation of Systems for High Energy Proton Beam Losses Measurements (part 2. Mathematical Aspects and Experimental Results)* In "Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference", Berlin, Germany, 1992, vol 2, pp 1055-1057.
 46. Clausen M., Shevtsov P., Lapitsky S., Seleznev V. *On Possibilities of Beam Loss Measuring Systems*. In "Proceedings of the First European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators", CERN PS/93-35, Geneva, Switzerland, 1993.
 47. Amosov V.V., Belikov S.V., Bugorsky A.P., Chesnokov Yu.A., Galyaev N., Gurzhiev S.N., Ermolaev V.I., Ivanilov A.A., Ivanov P.V., Konyushko V.I., Korablyev V.M., Korotkov V.A., Krupnov V.F., Kurnosenko A.I., Lapitsky S.N., Makeev V.V., Makonin S.V., Mukhin A.I., Myagkov A.G., Polyarush A.Yu., Rzaev R.A., Sapunov Yu.M., Seleznev V.S., Sokolov A.A., Sviridov Yu., Terekhov V.I., Uzunyan A.V., Zapolsky V.N. *First results of the 1989 Serpukhov beam-dump experiment*. In "Proceedings of EPS Conference on High Energy Physics", Madrid, Spain, 1989.
 48. Crisp J., Gubrienko K., Seleznev V. *Stripline Detectors for Fermilab Main Injector*. В сборнике "XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц", Протвино, Россия, 1999, том 1, стр. 236-240.
 49. Kurochkin I., Lapitsky S., Mokhov N., Seleznev V. *Beam Loss Monitor for Superconducting Accelerators*. Препринт ИФВЭ 91-168, Протвино, 1991; Nuclear Instruments and Methods, A 329 (1993), pp 367-370.
 50. Lapitsky S., Seleznev V. *Superconducting Elektromagnet for Charged-Particle Accelerator*. PCT/SU91/001-49, PCT GAZETTE, No 04/1993, p 1701.

51. Gubrienko K., Krouptchenkov I., Makonin S., Seleznev V., Solodovnik F., Sytin A., Vraznov M., Wittenburg K. *Precision Geometric Parameter Gage for Synchrotron Radiation*. In "Proceedings of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems", San Jose, USA, 2001, pp 573-575.
52. Ломакин Е., Вражнов М., Крупченков И., Селезнёв В., Ходырев Ю., Виттенбург К. *Исследование нагрева мониторов синхротронного излучения от e^+e^- пучков DESY*. В сборнике "XIX Совецание по ускорителям заряженных частиц", Дубна, Россия, 2004.

Рукопись поступила 27 декабря 2004 г.

В.С. Селезнев.

Унифицированные детекторы пучков заряженных частиц высоких энергий и их применение в системах диагностики каналов и ускорителей.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 30.12.2004. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 2,6. Уч.-изд.л. 2,15. Тираж 100. Заказ 4. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

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

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т, 2004 –51, И Ф В Э, 2004
