



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2004-8
На правах рукописи

Асеев Алексей Акимович

**МЕТОДЫ ВЫВОДА ЧАСТИЦ
ИЗ ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ
НА ВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
ВНУТРЕННИХ МИШЕНЕЙ**

01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Протвино 2004

УДК 539.1.07

Работа выполнена в Отделении ускорителей У-70 ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН РФ, доктор физико-математических наук С.П.Денисов (ИФВЭ, Протвино), доктор технических наук С.И.Тютюнников (ОИЯИ, Дубна), доктор физико-математических наук А.В.Агафонов (ФИАН, Москва).

Ведущая организация – НИИЭФА, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2004 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.05 при Объединенном институте ядерных исследований по адресу: 141980, Дубна Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ОИЯИ и ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 720.001.05

В.Г. Кривохижин

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

На ускорителе ИФВЭ осуществляется широкая программа экспериментов с участием многих физических центров России и мира: ИТЭФ, ОИЯИ, МИФИ, ИЯИ РАН, ФИАН, НИИЯФ МГУ, а также ЕрФИ, ТбГУ, CERN, FNAL, DESY, KEK и др. Исторически сложилось так, что в ИФВЭ большинство (14 из 22, утвержденных научно-координационным Советом) физических экспериментов ведутся на пучках частиц, выводимых из У-70 благодаря использованию внутренних мишеней.

Насыщенность программы физических исследований требует осуществления таких режимов вывода пучков, которые позволяли бы обеспечить в цикле ускорителя одновременную работу возможно большего количества физических установок.

Сложность задач, возникавших перед системой вывода пучков, и сложность условий, в которых они должны были решаться, обусловили ряд проблем, затрудняющих разработку и осуществление новых режимов вывода частиц для экспериментов. Результаты решения этих проблем составляют основу настоящей диссертации.

Цель работы — повышение эффективности физических исследований на ускорителях ИФВЭ и FNAL за счет развития возможностей для вывода частиц, включающих в себя:

- увеличение коэффициента одновременности работы физических установок на пучках вторичных частиц с 2–3 до 4–5 и получение качественно новых параметров пучков по временной модуляции;
- разработку и исследование новых методов вывода ускоренных протонов и осуществление одновременного (в цикле ускорителя) вывода первичных протонов и вторичных частиц для 5–6 разных экспериментов;

- совмещение новых режимов вывода пучков с быстрым и/или резонансным медленным выводами ускоренных протонов, позволяющее довести коэффициент одновременности экспериментов до 7–8;
- оптимизацию параметров пучка и снижение облучаемости оборудования при ускорении и выводе частиц.

Научная новизна

1. **Впервые в отечественной практике** вывода пучков вторичных частиц на У–70 обеспечено **одновременное** в цикле ускорителя проведение 4–5 экспериментов.
2. **Впервые в отечественной и мировой практике** при одновременной работе 4–5 внутренних мишеней в каждом из каналов получены пучки вторичных частиц с уровнем временной модуляции интенсивности $\sim 7\text{--}10\%$.
3. **Впервые в отечественной и мировой практике** в ИФВЭ осуществлен нерезонансный медленный вывод (НМВ) протонов с энергией 70 ГэВ из жесткофокусирующего ускорителя, что обеспечило осуществление новых экспериментов на установках СФИНКС, ФОДС, ФОДС–2, СВД и КМН. Экспериментально подтверждены предсказания A.Maschke и Ch.Steinbach о возможности такого вывода из Тэватрона и SPS.
4. **Впервые в отечественной и мировой практике** в ИФВЭ для исследований неизвестного ранее физического явления “скейлинговой асимметрии” на установке ПРОЗА осуществлен многооборотный вывод пучка протонов с энергией 70 ГэВ с использованием изогнутого монокристалла Si. Исследован вывод пучка протонов с помощью изогнутого монокристалла на установку ВЕС. Другой возможности вывести пучок протонов на эти установки не существовало.
5. **Впервые в мировой практике** с помощью изогнутого монокристалла Si при участии автора осуществлен вывод протонов с энергией 900 ГэВ из крупнейшего ускорителя–коллайдера FNAL Тэватрона. Использован опыт вывода пучка из У–70, осуществленного ранее в ИФВЭ.
6. Результаты многолетних исследований потерь частиц в У–70 при их ускорении и выводе и связанных с ними радиационных нагрузок на оборудование подтвердили, что при нагрузках $\sim 10^8$ рад резко меняются свойства используемых материалов, что приводит к выходу из строя уникального оборудования.

Практическая ценность работы

1. **Одновременный в цикле ускорителя** длительностью до 2 с вывод пучков вторичных частиц для 4–5 экспериментов увеличил эффективность таких экспериментов более чем в 2 раза.

2. Благодаря **тонкой мишени** получены пучки вторичных частиц нового качества, в которых подавлены как низкочастотные (до сотен герц) пульсации систем ускорителя, так и ВЧ-пульсации (~ 200 кГц). Новое качество пучков при работе тонкой мишени дополнительно повышает эффективность физических экспериментов примерно в 1.5 раза.

3. **Новый метод вывода протонов** — нерезонансный медленный вывод (НМВ) сделал доступным для экспериментов диапазон промежуточных интенсивностей $У-70$ $10^7 \div 10^{11}$ частиц за цикл, что обеспечило выполнение экспериментальной программы установки ФОДС (на канале 8), открыло возможности для новых экспериментов.

4. НМВ **протонного пучка** на установки ФОДС-2, СВД (канал 22), СФИНКС (канал 21) и Комплекс меченых нейтрино (канал 23) параллельно с выводом **вторичных частиц** в каналы 2; 14; 4; 18; 5Н и др. обеспечил (по сравнению с последовательной работой) увеличение примерно в 2 раза длительности вывода пучков при улучшении их временной структуры и повышении коэффициента одновременности на 25%. Показана перспективность использования НМВ.

5. **Новый метод вывода протонов** из ускорителя с помощью изогнутого монокристалла Si обеспечил возможность проведения в ИФВЭ новой серии поляризационных экспериментов на установке ПРОЗА. Реализована возможность одновременного вывода вторичных частиц и первичных протонов для разных экспериментов.

6. **В результате совмещения** в цикле ускорителя режимов вывода вторичных частиц (с 4–5 внутренних мишеней) и ускоренных протонов (с применением изогнутых монокристаллов и НМВ) достигнут коэффициент одновременности работы физических установок с максимальной длительностью вывода — 6. При последовательной работе с быстрым и/или резонансным медленным выводами коэффициент одновременности экспериментов в одном цикле может достигать 7–8.

7. Эксперимент Е853 подтвердил каналирование частиц самой высокой энергии из исследовавшихся когда-либо — 900 ГэВ. Вывод пучка может осуществляться без влияния на “коллайдерные” эксперименты и одновременно с их проведением.

8. Реализованы меры по оптимизации параметров пучка и минимизации потерь протонов с энергией 100 МэВ при инжекции в ускоритель. Обсуждаются другие меры, реализованные и предлагаемые к реализации на У-70. Ожидаемый результат — снижение облучаемости оборудования У-70 в 4–5 раз.

Все полученные результаты носят общий характер и могут быть использованы (и использовались) для разработки и осуществления новых

методов вывода частиц как на существующих (например, на SPS CERN и Tevatron FNAL), так и на проектируемых или на строящихся ускорителях на сверхвысокие энергии (SSC и LHC).

На защиту выносятся результаты, полученные в процессе развития существующих, разработки, исследований и осуществления новых методов вывода частиц из ускорителей ИФВЭ и FNAL:

1. Возможность **одновременного** проведения 4–5 экспериментов при независимом наведении протонного пучка на три внутренние мишени любых из 6 существующих каналов вторичных частиц.
2. Внедрение для генерации вторичных частиц тонкой мишени из углеродной ткани, обеспечившей улучшение временной структуры выводимых пучков в 8–10 раз.
3. Разработка и экспериментальные исследования **нового метода вывода протонов** — нерезонансного медленного вывода на установку ФОДС. Осуществление в ИФВЭ данного метода вывода открыло возможность для новых экспериментов.
4. Осуществление **одновременной работы** нерезонансного медленного вывода на установки ФОДС–2, СВД, СФИНКС, КМН и внутренних мишеней более чем в 2 раза увеличило длительность вывода пучков, улучшило временную структуру и повысило коэффициент одновременности на 20–25%.
5. **Новый метод вывода протонов** с использованием изогнутых монокристаллов для **физических экспериментов** на установку ПРОЗА. Исследования возможности вывода протонов с помощью изогнутого монокристалла на установку ВЕС.
6. Вывод протонов с энергией 900 ГэВ с помощью изогнутого монокристалла из крупнейшего сверхпроводящего ускорителя–коллайдера Тэватрона FNAL. Использован опыт, ранее полученный в ИФВЭ.
7. **Одновременный вывод** вторичных частиц и первичных протонов (с помощью изогнутого монокристалла и/или НМВ) для 5–6 разных экспериментов.
8. Исследование “нестандартных” способов вывода: параллельной работы ВМ с РМВ, РМВ в два независимых направления, двукратный БВ высокоинтенсивного пучка, что открывает возможности осуществления новых экспериментов по физике высоких энергий.
9. Осуществление последовательной работы новых режимов вывода частиц с быстрым и/или резонансным медленным выводами первичного пучка, обеспечившее коэффициент одновременности работы физических установок в цикле ускорителя — 7–8.

10. Оптимизация параметров пучка и снижение потерь протонов с энергией 100 МэВ при инжекции в ускоритель. Реализация и предложения мер снижения облучаемости оборудования У-70 при высоких энергиях. Ожидаемый фактор снижения облучаемости 4–5 раз.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на:

- научных семинарах ИФВЭ и FNAL;
- всесоюзных и российских совещаниях по ускорителям заряженных частиц в Дубне (1982; 1988; 1992 гг.), в Москве (1990 г.), Протвино (1996; 2000 гг.);
- европейских конференциях по ускорителям в Ницце (1990 г.), Берлине (1992 г.), Лондоне (1994 г.), Барселоне (1996 г.);
- всесоюзных совещаниях “Физика на УНК” (Протвино, 1989 г.) и “Проблемы применения эффектов каналирования частиц кристаллами в физике высоких энергий” (Протвино, 1991 г.);
- национальных конференциях США по ускорителям в Сан-Франциско (1991 г.), Вашингтоне (1993 г.), Далласе (1995 г.), Чикаго (2001 г.);
- международных совещаниях “Channeling and other coherent crystal effects at relativistic energy” (Дания, 1995 г.), “Near Beam Physics” (FNAL, США, 1997 г.), “Elastic and diffractive scattering” (Blois VIII) (Протвино, 1999 г.);
- совещаниях экспертов сотрудничества E853 (FNAL, Батавия, 1993–1997 гг.);

и опубликованы в виде препринтов ИФВЭ и FNAL, статей в российских (ЖТФ и ПТЭ) и иностранных (Nuclear Instruments & Methods) журналах, Трудах соответствующих конференций.

Высокая ценность научно-технических результатов для физических экспериментов от внедрения тонкой внутренней мишени подтверждена решением Научно-технического совета ИФВЭ.

Составляющая основу диссертации программа **“Исследование и развитие новых методов вывода пучков из ускорителей”** получила высокую оценку всех экспертов (из России, стран Европы и США), и ей был присужден долгосрочный грант Международного научного фонда и правительства РФ. Заявленная программа успешно выполнена. Опубликовано около 10 научных работ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 197 наименований. Объем диссертации без списка литературы составляет 272 страницы, в том числе 139

рисунков и 27 таблиц. Список основных научных работ, представляющих важнейшие результаты диссертации, составляет 37 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** приведены примеры существующих методов вывода частиц, обоснована необходимость совмещения разных способов вывода для повышения эффективности физических экспериментов. Даются пояснения физических принципов **двух новых методов вывода ускоренных протонов**, впервые в практике физического эксперимента исследованных и реализованных для вывода пучков на протонном синхротроне ИФВЭ, что обеспечило успешное выполнение ряда новых экспериментов.

Представлено краткое содержание глав диссертации, приведен список опубликованных работ, составляющих ее “ядро”, и в которых изложен ее основной материал.

В первой главе диссертации приведены результаты исследований и развития методов вывода частиц, существующих на ускорителе ИФВЭ:

- вывод вторичных частиц с внутренних мишеней (ВМ),
- быстрый вывод (БВ),
- резонансный медленный вывод (РМВ) ускоренных протонов.

Особенность ускорителя ИФВЭ: экспериментальные исследования на нем были начаты практически сразу после запуска У-70 (1967 г.) и в течение ряда лет проводились **только на пучках вторичных частиц**, генерируемых на ВМ. Уже первые годы исследований дали ценный материал для понимания закономерностей строения микромира, а полученные результаты стали основой формирования новых направлений в их исследовании не только у нас в стране, но и за рубежом. В дальнейшем, с вводом в строй системы БВ протонов (1972 г.), а позднее и системы РМВ (1979 г.) задача формирования и вывода пучков вторичных частиц для физических экспериментов на У-70 не потеряла своей значимости.

Для повышения эффективности физических исследований потребовались разработка и осуществление одновременной (параллельной) работы 4–5 экспериментальных установок на пучках вторичных частиц, их последовательной работы с БВ и РМВ протонов, а также совмещение в одном цикле выводов вторичных частиц и протонов на 5–6 экспериментальных установок.

Насыщенная экспериментальная программа Института требовала исследований и развития режимов вывода высокоинтенсивного ($\geq 10^{13}$ частиц за цикл) пучка ускоренных протонов, обеспечивающих повышение эффективности экспериментов:

- совмещение работы установки Нейтринный детектор с пузырьковой камерой СКАТ, увеличение числа срабатываний БВ на эти установки и повышение средней эффективности вывода;
- исследование возможности одновременной работы ВМ с РМВ;
- расчеты РМВ протонов в два независимых направления и разработка предложений для его осуществления.

Совместная работа физических установок в цикле ускорителя может осуществляться:

- **Последовательно.** Пучок подводится к разным мишеням с помощью локальных искажений орбиты, создаваемых последовательно на плоской части магнитного цикла. Длительность вывода частиц в каждое направление в этом случае сокращается пропорционально числу работающих установок.
- **Параллельно** (одновременно). Это наиболее предпочтительный режим для экспериментов, использующих счетную методику. Длительность вывода пучков в данном случае ограничивается лишь длительностью плоской части магнитного цикла.

Режимы совмещения физических экспериментов, проводимых до ввода в строй БВ и РМВ, с пучками вторичных частиц показаны на **рис. 1**, представляющем магнитный цикл с промежуточной плоской частью (см. диссертацию Мызникова К.П., ИФВЭ, 1974 г.).

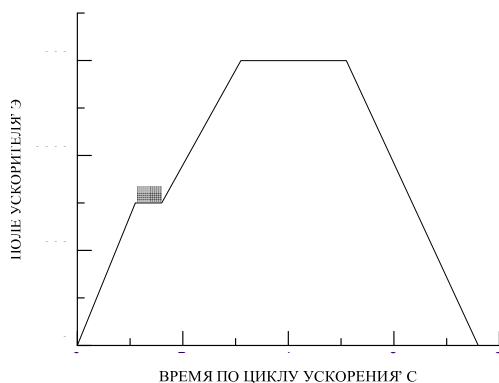


Рис. 1. Режимы работы внутренних мишеней в цикле ускорителя: 1 — вывод частиц промежуточных энергий; 2 — вывод с одной из мишеней; 3, 4 — одновременный вывод

Из рисунка видно, что практиковался последовательно-параллельный режим вывода пучков вторичных частиц, причем один из выводов осуществлялся на промежуточном “столе” магнитного цикла, формируемом

в диапазоне энергий 20–50 ГэВ¹. При максимальной же энергии ускоренного пучка сначала осуществлялся вывод вторичных частиц с одной из мишеней (например, в каналы 6; 18; 4Н) в течение 0.3–0.5 с (или 0.5 мс при быстром сбросе), а затем одновременно с двух ВМ каналов 2 и 4 в течение 1.0–1.5 с (в зависимости от длительности работы первой мишени). Одновременная работа физических установок каналов 2 и 4 представляла наибольший интерес с точки зрения важности результатов утвержденной программы исследований.

Таким образом, коэффициент одновременности работы установок на пучках вторичных частиц с внутренних мишеней был равен 2–3. Суммарный коэффициент одновременности, достигаемый в одном цикле в совместных режимах, 3–4.

В силу насыщенности экспериментальных программ на каналах 2; 14 и 4, где находятся установки ИФВЭ, ОИЯИ, ИТЭФ, ИЯИ РАН, ФИАН и других физических центров, реализованный ранее режим параллельной работы двух мишеней обеспечивал пучками вторичных частиц только эти каналы. Установки каналов 18; 4Н (впоследствии 5Н), РП и др. работали последовательно, что снижало эффективность всех экспериментов, так как длительность вывода была в два раза меньше максимальной. Поэтому обеспечение одновременного вывода частиц в направления этих каналов вызывало огромный интерес.

В результате выполнения комплекса расчетных и экспериментальных исследований определены особенности параллельной работы нескольких мишеней и осуществлены сложные режимы, обеспечившие совмещение в одном цикле до 5 установок только на пучках вторичных частиц. С учетом экспериментов на БВ и РМВ число физических установок, работающих в одном цикле ускорителя, достигает 6–7.

Примеры совмещения работы установок в этом случае показаны на **рис. 2**, где в начале плоской части осуществляется БВ (6), далее — параллельная или параллельно-последовательная работа (рис. 2а, б) внутренних мишеней (1–5) с одной из них или с РМВ (7), либо параллельная работа мишеней на всей плоской части цикла — рис. 2в.

По сравнению с режимом рис. 1, где эффективное время вывода, приведенное к одной мишени, составляет ≈ 2.5 с, эффективное время вывода в режиме рис. 2в достигает $\approx 5 \times 1,8$ с = 9 с.

Приводятся результаты исследований тонких мишеней, вносящих новые эффекты в динамику пучка ускоренных протонов и дающих новое качество выводимым пучкам частиц. Использование внутренних мишеней ускорителя

¹Этот вывод не получил экспериментального развития из-за сокращения плоской части цикла, соответствующей энергии 70 ГэВ.

теля в условиях достигнутых интенсивностей ($\geq 10^{13}$ частиц за цикл) и при высоких плотностях частиц в ускоренных пучках ограничивается их термической стойкостью.

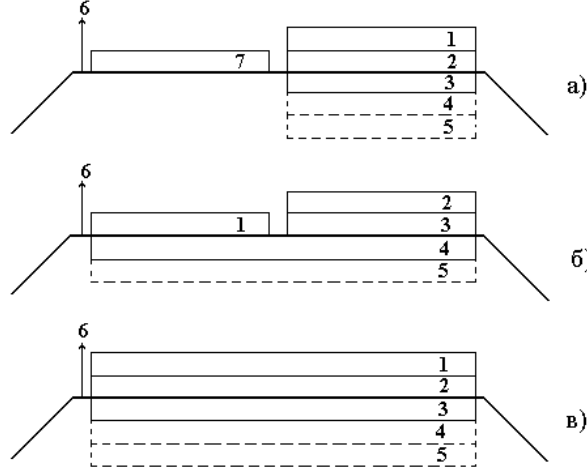


Рис. 2. Типичные примеры совмещения режимов вывода пучка при осуществлении «тройного» наведения совместно с работой мишеней «в тени». 1–5 — вывод вторичных частиц; 6 — БВ; 7 — РМВ.

Многолетняя практика показала, что применение «толстых» мишеней ($\sim 0.1L_N$ — ядерной длины свободного пробега) возможно до интенсивности взаимодействующего с мишенью пучка $\sim 2 \cdot 10^{12}$ протонов/цикл. При более высокой интенсивности возможны тепловые повреждения, приводящие к разрушению мишени и срыву экспериментов.

Переход на «тонкие» мишени (толщиной по пучку ~ 50 мг/см²) обусловил существенное изменение динамики их нагрева и охлаждения. Для тонких мишеней решалось уравнение теплопроводности в виде

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\pm \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=h} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4); T(r_0) = T_0 = const, \quad (2)$$

где T — температура; τ — время; r, z — текущие координаты в радиальном и осевом направлениях; $a^2 = \lambda / \rho \cdot c_p$, λ, ρ, c_p — коэффициент теплопроводности, плотность и теплоемкость материала мишени; r_0 и h — радиус

мишени и ее толщина; ε — коэффициент черноты; T_0 — температура держателя мишени; σ — постоянная Стефана–Больцмана.

Расчеты показали, что в интересующем нас диапазоне толщин мишеней (до десятков микрометров) и для интенсивностей пучка $10^{12} - 10^{13}$ протонов за цикл, сбрасываемых на мишень, основным процессом, определяющим отвод тепла, является излучение с поверхности мишени.

На **рис. 3** приведены расчетные зависимости температуры разогрева мишеней из различных материалов толщиной 10 мкм от интенсивности взаимодействующего пучка. Видно, что мишени из Cu и Be можно использовать до интенсивности $(1.5 \div 2) \cdot 10^{12}$, а углеродные пленки могут выдержать сброс до 10^{13} протонов за цикл.

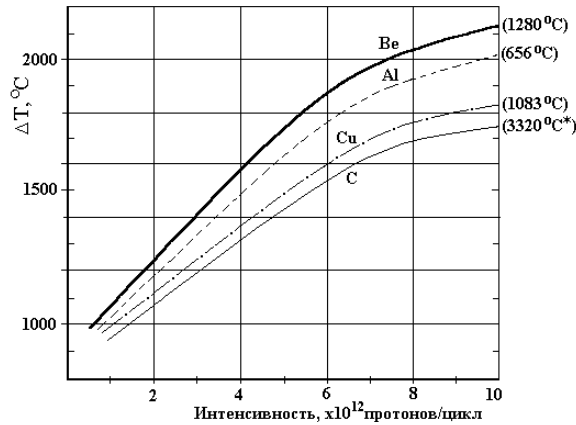


Рис. 3. Зависимость температуры нагрева мишеней из различных материалов от интенсивности. Справа — температуры плавления.

Кроме того, Be и C являются наиболее подходящими материалами в качестве мишеней для генерации вторичных частиц; минимальное отношение Z/ρ обеспечивает преобладание процессов поглощения протонов пучка до того, как из-за рассеяния они будут потеряны на стенках камеры ускорителя. Мишень из C толщиной ~ 50 мг/см² обусловила появление ряда новых эффектов в динамике пучка, что способствовало получению высококачественных пучков частиц для всех параллельно работающих физических установок.

На **рис. 4** представлены осциллограммы временной структуры пучков вторичных частиц каналов 2 и 4 при их одновременной работе на всей

плоской части магнитного цикла: рис. 4а — работа мишеней старой конструкции из Ве, рис. 4б — работа тонкой углеродной мишени канала 2 совместно с Ве мишенью канала 4.

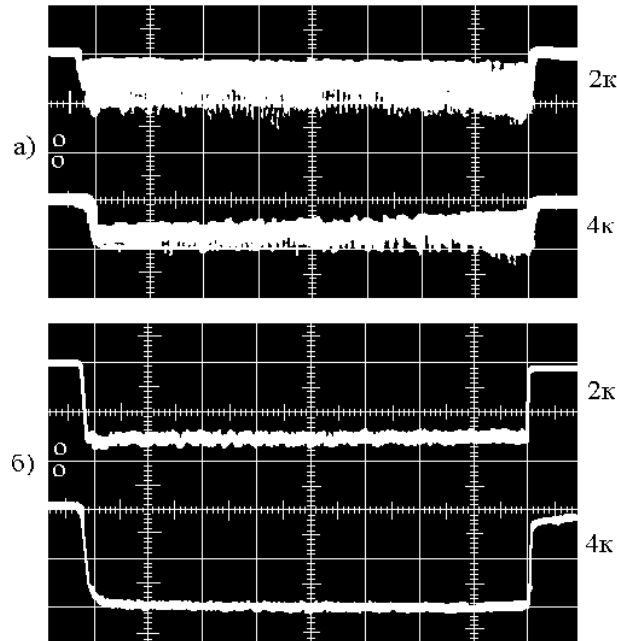


Рис. 4. Временная структура вторичных частиц каналов 2 и 4 при их одновременной работе: а) работа двух толстых мишеней из Ве; б) мишень канала 2 — тонкая углеродная ткань. (0.2 с/клетку.)

Из сравнения осциллограмм видно, что ввод тонкой углеродной мишени привел к снижению величины пульсаций почти на порядок. При этом пульсации уменьшились не только в канале 2, но и в канале 4, где оставлена “толстая” мишень. При большом времени жизни частиц (более 1000 пересечений вместо ~ 10 для “толстой”) тонкая мишень взаимодействует с большей площадью поперечного сечения пучка, что ослабляет вклад пульсаций систем ускорителя во временную структуру вторичных частиц и облегчает условия наведения пучка на мишени.

Следует отметить, что уровень пульсаций в сигналах сброса каналов 2 и 4 не превышает 7–10% даже при их одновременной работе после БВ и РМВ, что до внедрения тонкой мишени удавалось получить лишь для некоторых режимов с помощью кикер-магнита БВ.

В настоящее время условия работы физических установок таковы, что необходимо совмещение экспериментов с относительно низкой интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^{12}$ протонов за цикл — для внутренних мишеней и $\geq 10^{13}$ протонов/цикл для нейтринных исследований на быстровыведенном пучке. В таком режиме из 29 ускоренных банчей системой БВ выводятся 24–25 банчей, в результате чего формируется сильная азимутальная неоднородность плотности пучка в ускорителе, вызывающая появление в выводимых пучках временной структуры с частотой 200 кГц.

Выравнивание азимутальной плотности протонов до введения тонких мишеней достигалось с помощью ВЧ-гимнастики, заключающейся в перебросе фазы ускоряющего напряжения и перегруппировке циркулирующего пучка, производимых после БВ. Однако при таком способе борьбы с ВЧ-пульсациями длительность вывода пучков для физических экспериментов сокращается на 10–15% и сохраняются характерные для систем наведения пучка на “толстые” мишени низкочастотные пульсации 50–600 Гц.

Динамика пучка ускоренных частиц при взаимодействии с тонкой мишенью в значительной мере способствует выравниванию плотности частиц по орбите. Это хорошо видно на **рис. 5**, где приведены осциллограммы сигналов мониторов головной части канала вторичных частиц при работе с тонкой мишенью и с мишенью старой конструкции.

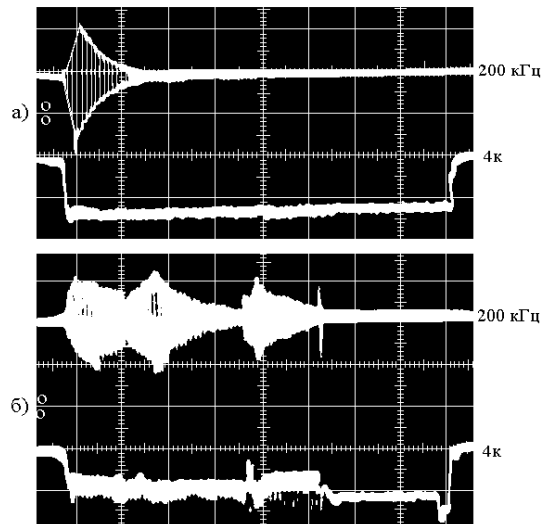


Рис. 5. Осциллограммы пульсаций с частотой 200 кГц и временной структуры сброса канала 4: **а)** при работе с тонкой мишенью канала 2; **б)** без тонкой мишени (0.2 с/клетку).

Для тонкой мишени характерно быстрое затухание пульсаций 200 кГц, которые не успевают оказать влияния на временную структуру вторичных

частиц. Объяснение механизма затухания пульсаций 200 кГц заключается в следующем. Взаимодействие ускоренного пучка с мишенью сопровождается многократным кулоновским рассеянием, ионизационными потерями энергии, упругим ядерным рассеянием и ядерным поглощением с образованием вторичных частиц. Кулоновское и упругое ядерное рассеяния при каждом пересечении мишени изменяют амплитуды и фазы бетатронных колебаний частиц, ионизационные потери энергии приводят к радиальному сдвигу замкнутой орбиты. В результате увеличиваются поперечные размеры и импульсный разброс пучка. Время разбанчивания пучка с импульсным разбросом частиц $\Delta p/p_0$ при постоянном магнитном поле выражается формулой

$$\Delta t \approx \frac{1}{2 \cdot f_0 \cdot \alpha \cdot \Delta p/p_0}, \quad (3)$$

где f_0 — частота обращения пучка в ускорителе; α — коэффициент расширения орбит ($\alpha = 0.01112$). Результаты математического моделирования времени дебанчивания пучка в условиях, соответствующих реальным режимам работы У-70 для тонкой мишени, хорошо согласуются с экспериментом.

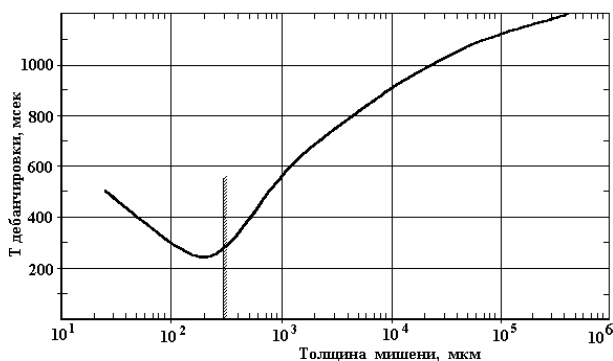


Рис. 6. Зависимость времени дебанчивания пучка, вступившего во взаимодействие с С мишенью, от ее толщины.

Зависимость времени дебанчивания пучка от толщины для углеродной мишени представлена на **рис. 6**. Видно, что наименьшее время дебанчивания приходится на толщины около 200 мкм. Выбор оптимальной толщины мишени (отмечена штрихованной линией) исключает необходимость применения дополнительных и дорогих устройств (кикер-магнит, ВЧ-гимнастика и др.), сокращающих время вывода.

На **рис. 7** представлены осциллограммы, характеризующие временную структуру пучков вторичных частиц трех каналов при одновременном наведении пучка на три внутренние мишени. Работа осуществляется после БВ, на орбите оставлено 5 банчей. Видно, что даже в условиях резко неоднородной плотности азимутального распределения ускоренных протонов, и несмотря на добавление еще одной толстой мишени и бампа замкнутой орбиты, тонкая углеродная мишень позволяет обеспечить высокое качество и, следовательно, высокую эффективность использования пучка ускорителя для экспериментов.

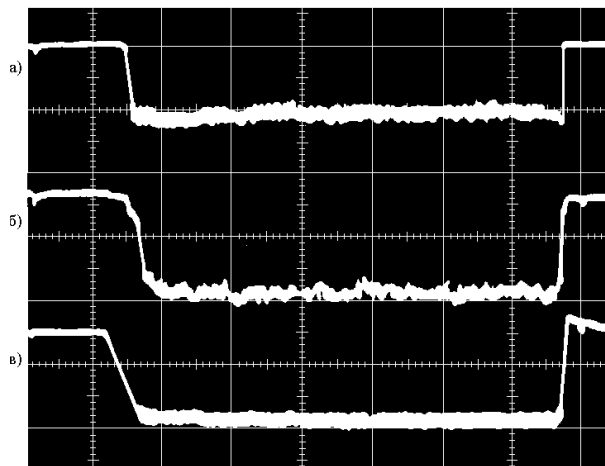


Рис. 7. Осциллограммы временной структуры вторичных частиц при работе трех мишеней после БВ: **а)** вывод в канал 2; **б)** вывод в канал 4; **в)** вывод в канал 18 (0.2 с/клетку).

Два состояния циркулирующего пучка ускорителя, о чем сообщалось выше, иллюстрирует **рис. 8**. Осциллограммы рис. 8а,б с фильтра, выделяющего гармонику 200 кГц из сигнала, наводимого пучком на пикап-электрод У-70, показывают наличие ВЧ-структуры в циркулирующем пучке ускорителя. Рис. 8а соответствует случаю, когда в ускорителе оставалось 5 банчей из 29, и пучок дебанчировался в соответствии с зависимостью (3). ВМ не работали. Рис. 8б соответствует случаю взаимодействия циркулирующего пучка (тех же 5 банчей) с двумя внутренними мишенями ускорителя, одна из которых тонкая.

Видно, что здесь также в течение всего времени жизни пучка имеется однооборотная структура с частотой 200 кГц. Уменьшение амплитуды

огибающей объясняется снижением общей интенсивности циркулирующего пучка из-за поглощения протонов в мишенях. Рис. 8в — сигналы монитора вторичных частиц, обеспечивающего обратную связь на системы наведения пучка на ВМ (верхний луч), и монитора, установленного в начале канала 4, из сигнала которого с помощью фильтра выделена гармоника 200 кГц (нижний луч).

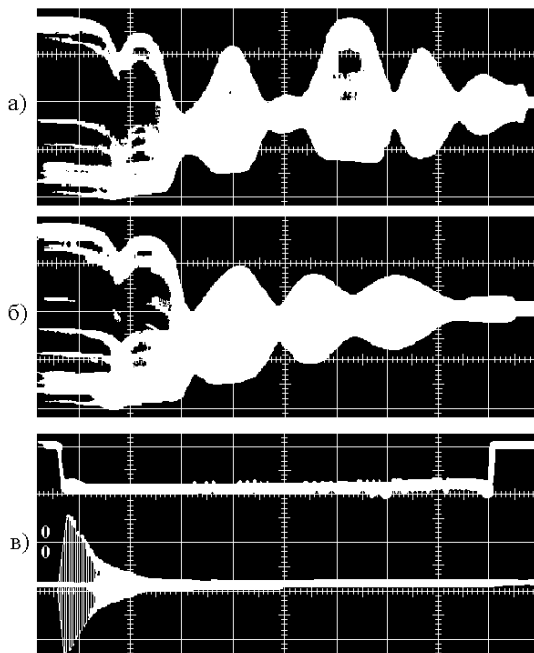


Рис. 8. Осциллограммы ВЧ-структуры 200 кГц после БВ: а) внутренние мишени не работают; б) при одновременной работе толстой и тонкой мишеней; в) временная структура пучка вторичных частиц (верх) и затухание ВЧ-структуры в канале 4 (низ) (0.2 с/клетку).

Характерным признаком работы тонкой мишени является быстрое затухание в выводимых пучках пульсаций 200 кГц, что исключает их влияние на эффективность набора данных в течение всего времени вывода частиц. Такому затуханию способствуют два фактора: увеличение $\Delta p/p$ частиц при каждом пересечении мишени и значительное (более чем на два порядка) увеличение времени их жизни по сравнению со временем жизни в случае толстой мишени.

Таким образом, на основании анализа рис. 8 можно констатировать, что на плоской части магнитного цикла в циркулирующем пучке, первоначально имевшем ярко выраженную однооборотную структуру, существует часть пучка, имеющая близкую к равномерной азимутальную плотность частиц. Она состоит из протонов, рассеянных из плотной части исходного

пучка в процессе взаимодействия с тонкой ВМ. Азимутальная однородность сохраняется в течение всего времени вывода за счет равномерного подведения пучка к мишени, осуществляемого бампом замкнутой орбиты. Центральная, более плотная часть ускоренного пучка сохраняет азимутальную неоднородность в течение всего времени вывода.

Математическое моделирование процессов, происходящих при взаимодействии пучка с тонкой внутренней мишенью и влияющих на динамику частиц ускоренного пучка, показало, что:

- Положение внутренней мишени относительно центра вакуумной камеры У-70 ($R > 0$ или $R < 0$) существенным образом влияет на динамику частиц.
- При координатах мишени $R > 0$ (это реальные условия работы) обеспечивается более сильное подавление модуляции ВЧ-структуры, чем при работе на $R < 0$.
- Форма банча пучка, циркулирующего в У-70, оказывает заметное влияние на глубину модуляции интенсивности выводимых пучков.

В соответствии с ранее разработанной схемой вывода пучка, в 1974 г. был введен в эксплуатацию канал 8, обеспечивший начало нейтринных исследований на У-70. Система БВ позволяла выводить любое количество банчей ускоренного пучка (из 30) с эффективностью, близкой к 100%, за время от 165 нс до 5 мкс при низком уровне потерь в канале.

Повышение интенсивности пучка при БВ до $\geq 10^{13}$ протонов/цикл после ввода устара выявило новые проблемы в обеспечении требований экспериментов, заключавшиеся в увеличении длительности вывода и уменьшении потерь по трассе вывода. Первая из этих проблем связана с возможностями регистрирующей аппаратуры и фоновыми условиями установки Нейтринный детектор (НД) и не удовлетворяла требованиям совмещения экспериментов установки НД и пузырьковой камеры СКАТ. Вторая проблема была обусловлена снижением эффективности вывода пучка по новой трассе — через септум-магниты МВ из-за выхода из строя подвижного СМ-24, изготовленного в CERN.

В силу ряда причин, таких как высокая хроматичность, большой импульсный разброс пучка, влияние областей с сильной нелинейностью поля и др., быстрый резонансный вывод (БРВ)² оказался низкоэффективным. Требовалось осуществить двукратный вывод в течение времени работы фокусирующей системы нейтринного канала (~ 100 мкс), что влекло за собой реконструкцию системы кикер-магнитов БВ.

Был предложен способ вывода пучка, удовлетворяющий условиям совместимости работы с внутренними мишенями, требованиям НД и повы-

²К.П.Мызников и др. Препринт ИФВЭ 78-167, Серпухов, 1978.

шающий эффективность его работы с фактором 4. Поскольку увеличение времени вывода до ~ 100 мкс не противоречит условиям работы фокусирующей системы нейтринного канала, можно осуществить двукратный БВ по 10–12 банчей в каждом выводе с интервалом 10–50 мкс (см. **рис. 9**).

Расчеты показали, что решение данной задачи возможно, если оба существующие кикер-магниты КМ-14 и КМ-16 будут работать в тандем с половинной силой каждый (т.е. два модуля КМ-14 и пять модулей КМ-16, **формула "2+5"**). Вторая половина силы кикер-магнитов обеспечит повторный БВ через требуемый интервал времени по той же самой трассе (см. **рис. 10**, кривая 1).

Принцип программирования работы кикер-магнитов и экспериментальные результаты приводятся в диссертации.

Был опробован однократный вывод в условиях, точно соответствующих будущему эксперименту: для заброса пучка в апертуру СМ-18 использовались в тандем половины сил кикер-магнитов (формула "2+5"). Результаты показали, что такая схема позволяет осуществить двукратный БВ, удовлетворяющий условиям работы установки Нейтринный детектор, с эффективностью не ниже, чем при однооборотном БВ, что значительно превышает достигнутую при БРВ. Облучаемость оборудования ускорителя при выводе пучка по схеме "2+5" на 20–30% ниже, чем при БРВ. Экспериментально полученные значения размеров и координат центра тяжести пучка в характерных точках трассы вывода соответствуют требованиям его дальнейшей транспортировки.

В связи с созданием установок, использующих медленновыведенный пучок протонов, на У-70 стали применяться режимы последовательной работы БВ, РМВ и ВМ. Это более чем вдвое (при работе с РМВ) сократило длительность вывода пучков (~ 0.7 с вместо 1.7 с) и поставило задачу поиска таких режимов совместной работы ВМ и РМВ, которые обеспечили бы более эффективное использование плоской части магнитного цикла ускорителя.

Одним из решений этой проблемы оказалось осуществление параллельной работы ВМ с РМВ. Исследования показали, что одновременная работа РМВ и внутренних мишеней возможна. В частности, использование мишени блока 35 (канал 18) способствует улучшению временной структуры пучка протонов, выводимых резонансным образом: "эффективное" время вывода на установке ФОДС-2 (канал 22), характеризующее длительность вывода с учетом качества временной структуры, увеличивалось на 25% (с 400 до 500 мс) при интенсивности У-70 $1.8 \cdot 10^{12}$ и на 50% (с 400 до 600 мс) при $3.2 \cdot 10^{12}$ ускоренных протонов за цикл.

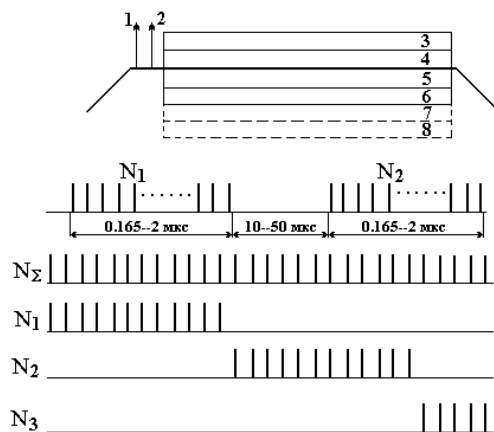


Рис. 9. Иллюстрация работы экспериментальных установок в цикле ускорителя при двукратном БВ. 1, 2 — БВ пучка с интервалом 10–50 мкс; 3–8 — одновременная работа ВМ, НМВ, изогнутого монокристалла. $N_{1,2}$ — число банчей, выводимых при каждом из БВ, N_3 — число банчей, оставленных для работы установок 3–8.

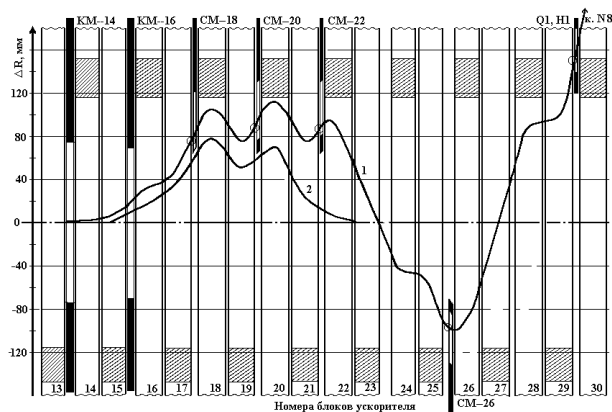


Рис. 10. Схема вывода протонов на установку НД при двукратном срабатывании КМ-14 и КМ-16 по формуле "2+5". 1 — трасса вывода, 2 — бамп замкнутой орбиты, способствующий забросу пучка, о — координаты пучка, полученные экспериментально.

Была также исследована параллельная работа РМВ и ВМ каналов 2 и 4, расположенных на участке вывода. При умеренной интенсивности ускорителя одновременный вывод протонов и вторичных частиц возможен, но проявляется взаимное влияние режимов друг на друга: снижение эффективности РМВ $\sim 5\%$ на мишень и проявление низкочастотных пульсаций систем ускорителя в структуре выводимых пучков вторичных частиц. Предполагается, что после достижения необходимой ($\sim 98\%$) эффективности РМВ эти исследования будут продолжены. Ожидается при этом, что работа тонких внутренних мишеней благоприятно скажется на улучшении структуры пучка, выводимого резонансным образом.

В расчетном плане по инициативе физиков-экспериментаторов исследована возможность осуществления РМВ пучка одновременно в два независимых направления. Показано, что в случае У-70 с новой системой вывода, включающей в себя в качестве дефлекторов септум-магниты новой конструкции ("сдвоенные"), возможно осуществление такого вывода с эффективностью не хуже, чем уже достигнутая для существующей системы при выводе пучка в одно направление. Приводятся схемные решения нового способа вывода.

Одновременный вывод резонансно раскачанного пучка в два направления был впервые осуществлен на ускорителе ZGS Аргонской национальной лаборатории США в 1972 г. Это потребовало существенной реконструкции ускорителя и использования резонанса $3Q_r=2$ (вместо $3Q_r=3$) для раскачки пучка. В этой схеме каналы вывода располагались на диаметрально противоположных сторонах кольца ускорителя, общая эффективность вывода была на уровне 45%.

В 1984 г. в CERN осуществлен одновременный вывод пучка с энергией 450 ГэВ из SPS в две экспериментальные зоны. Потребовалось обеспечить специальную перестройку Q_r на половине периметра SPS с использованием специальной системы питания фокусирующих квадрупольей 3- и 6-го полупериодов. Это позволило обеспечить сдвиг фаз сепаратрис между первым и вторым ЭД, кратный целому числу 2π . Вывод осуществлялся из промежутков 2 и 6, сдвинутых между собой на $1/3$ периода или на 9 длин волн бетатронного колебания. В ИФВЭ оказывается возможным осуществление одновременной работы резонансного медленного вывода в два направления, смещенные по отношению друг к другу **менее чем на половину длины волны** бетатронного колебания.

Возможность одновременного вывода пучка в два направления (любого из каналов 21; 22; 23 и 24, а в отдельных случаях и каналов 2 и 14) видна из **рис. 11**, где схематически показаны направления вывода и расположение основных септум-магнитов, обеспечивающих вывод пуч-

ка из камеры ускорителя в прямолинейных промежутках (ПП) 28 и 30. Возможные варианты вывода пучков (с точки зрения заброса резонансно раскачанного пучка в первый отклоняющий магнит) обозначены соответственно А, В и С. Септум-магниты (СМ) устанавливаются в ПП-18; 20; 22; 24 и 26, причем СМ-22, СМ-24 и СМ-26 представляют собой спаренные септум-магниты новой конструкции. Индекс "1" относится к магнитам, установленным на внешнем радиусе ускорителя, индекс "2" — на внутреннем.

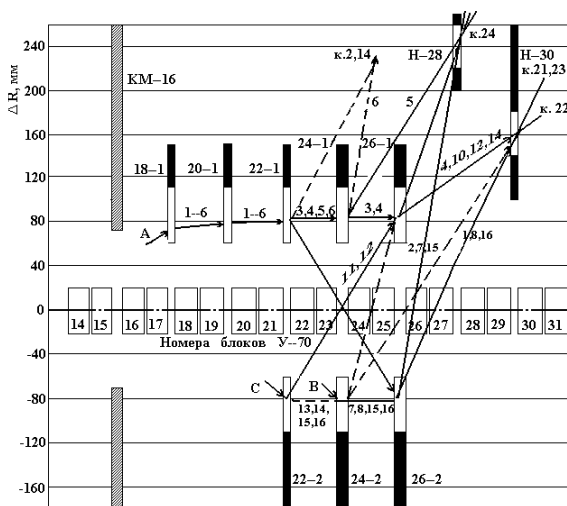


Рис. 11. Эскиз новой схемы вывода пучка.

Эскиз одного из септум-магнитов (совместная проработка А.Асеева и Э.Людмирского) представлен на рис. 12.

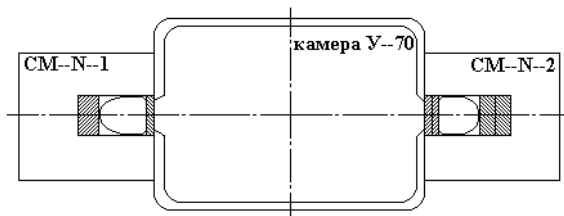


Рис. 12. Поперечное сечение двоянного септум-магнита.

Из рис. 11 видно, что в такой схеме существуют 16 вариантов вывода пучка в направления каналов 21; 22; 23 и 24, т.е. обеспечивается взаимозаменяемость септум-магнитов без нарушения работоспособности системы. Огибающие раскачанного пучка для всех трех сепаратрис и соответствующая расстановка септум-магнитов (см., например, рис. 37–38 диссертации) показывают возможности для обеспечения резонансного медленного вывода одновременно в два направления.

На рис. 13 представлены рассчитанные трассы вывода пучка для упоминавшихся выше вариантов. Как видно из рисунка, благодаря взаимозаменяемости элементов и с учетом параллельных ветвей надежность системы вывода повышается в несколько раз. Питание сдвоенных септум-магнитов может быть осуществлено от одного источника (существуют соответствующие схемные решения). Длительность вывода в любое (или оба одновременно) направление определяется возможностями систем питания септум-магнитов.

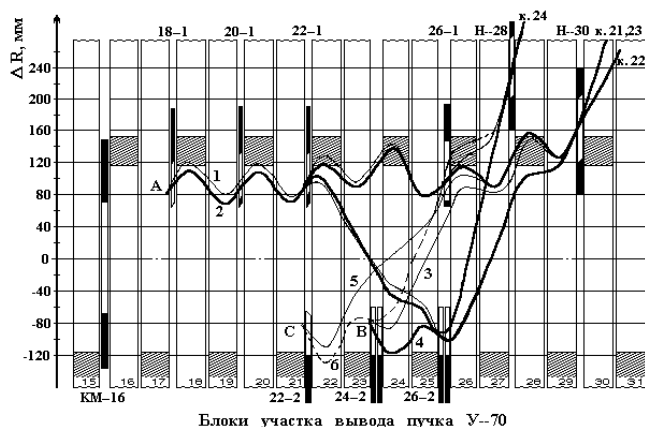


Рис. 13. Рассчитанные трассы резонансного медленного вывода.

Оценки эффективности вывода показывают, что с электростатическими дефлекторами в качестве первых отклоняющих элементов эффективность может быть ~90–95%, что выше эффективности 85%, достигнутой при работе в одно направление, когда первый дефлектор представлял собой септум-магнит с тонкой токовой перегородкой из Си. Новая схема обеспечит также возможность БВ пучка высокой интенсивности для нейтринных исследований. Совместное действие КМ-14 и КМ-16 обеспечит высокоэффективный БВ пучка на установку НД даже при эмиттансе пучка, соответствующем проектной интенсивности при работе У-70 с бустером.

Расширяющаяся программа физических исследований ИФВЭ поставила задачу осуществления **нового метода вывода пучков протонов**, заполняющего диапазон интенсивностей $10^7 \div 10^{11}$ частиц за цикл. При этом предъявлены жесткие требования к основным параметрам сформированного пучка, таким как амплитуда временной модуляции интенсивности, длительность вывода, пространственные и угловые размеры пучка на внешней мишени и др. В частности, в направления каналов 8; 21; 23 такие требования выдвигались экспериментальными группами установок ФОДС, ДАКОР, СФИНКС, позднее КМН, в направлении канала 22 — группами ФОДС-2, СВД. Существующая система резонансного медленного вывода в указанном диапазоне интенсивностей не может обеспечить требуемого качества временной структуры выведенного пучка.

Вторая глава содержит результаты разработки, экспериментальных исследований и осуществления нового режима — **нерезонансного медленного вывода** протонов (НМВ). Особенность данного метода вывода: увеличение амплитуд бетатронных колебаний частиц пучка происходит за счет рассеяния их на внутренних мишенях ускорителя. Система резонансной раскачки пучка, состоящая из квадрупольных линз наведения на резонанс, секступольных линз, создающих резонансную гармонику, и октупольных линз коррекции кубической нелинейности, не используется. Были изучены условия движения в ускорителе протонов, претерпевших рассеяние на малые (~ 1 мрад) углы на внутренних мишенях, и вывода их из ускорителя с помощью септум-магнитов.

Расчеты показали, что с помощью мишеней с определенными параметрами (материал, толщина по пучку и др.) и специально созданного локального искажения замкнутой орбиты можно обеспечить заброс в апертуру первого септум-магнита части протонов, получивших необходимый прирост амплитуд бетатронных колебаний. Углы рассеяния этих частиц находятся в интервале $0.3 \div 1.5$ мрад, что позволило рассчитывать на получение пучка с приемлемыми параметрами с интенсивностью $\sim 10^{10}$ при сбросе на мишень $\sim 10^{11}$ протонов за цикл. Новый режим вывода был исследован и реализован практически. Полученные результаты подтвердили основные расчетные данные.

Изучение динамики вывода рассеянных протонов из У-70 показало, что для этих целей возможно использование внутренних мишеней М35, М16, М17, М18. Мишени М35 и М18 действующие, расположены соответственно в блоке 35 У-70 и в 18-м прямолинейном промежутке (ПП-18) перед первым септум-магнитом системы медленного вывода СМ-18. М35 одновременно служит источником вторичных частиц для установки ГИПЕРОН (канал 18), поэтому ее использование для обеспечения параллельной рабо-

ты двух экспериментов было более предпочтительно. Мишени М16 и М17, рассмотренные в расчетном плане, соответственно в середине блока 16 (фокусирующего) и в ПП-17, изучались с целью дальнейшей оптимизации параметров выводимого пучка. В качестве материала мишени рассматривались Be, Al, Cu.

Среднеквадратичное приращение амплитуды частицы на азимуте септум-магнита из-за рассеяния на мишени выражается зависимостью

$$\Delta A_c = (\Delta R_c^2)^{1/2} = \Theta \cdot (\beta_m \cdot \beta_c)^{1/2} \cdot \sin \Delta \Psi, \quad (4)$$

где Θ — среднеквадратичный угол рассеяния; β_m, β_c — значения β -функций на азимутах мишени и септум-магнита соответственно, $\Delta \Psi$ — фазовый сдвиг между мишенью и септум-магнитом. Заброс частицы в апертуру септум-магнита произойдет в случае, когда после некоторого “последнего” пересечения мишени ее амплитуда колебаний окажется такой, что будет выполнено условие (при установке септум-магнита на краю огибающей невозмущенного пучка)

$$(\Delta R_c^2)^{1/2} > d, \quad (5)$$

где d — толщина токовой перегородки септум-магнита.

Расчетные результаты распределений частиц, заброшенных благодаря рассеянию на М35 (Cu, толщина по пучку 30 мм) в апертуру первого септум-магнита СМ-18, приведены на **рис. 14**, где показаны поперечное сечение раскачанного пучка и горизонтальное распределение плотности частиц в апертуре СМ-18 соответственно.

Из приведенного начального распределения формируется фазовый объем выводимого пучка, представленный на **рис. 15**. Для оптимального заброса частиц в апертуру СМ-18 и уменьшения потерь на токовой перегородке СМ-20 с помощью двух бампов, формируемых блоками 15, 21 и 16, 22, обеспечивается одинаковость отклонений центра тяжести пучка в ПП-18 и ПП-20.

Полная схема вывода пучка приведена на **рис. 16** (кривая 2). Здесь же для наглядности (кривая 1) показано результирующее искажение орбиты в районе СМ-18 и СМ-20.

Фазовые эллипсы выведенного из ускорителя пучка, служащие оптическим источником для расчета транспортировки пучка до внешних мишеней, приведены на **рис. 57** диссертации.

Анализ выбывания частиц в данном режиме показал, что потери протонного пучка распределяются следующим образом: неупругое ядерное взаимодействие в мишени $\sim 70\%$, потери на стенках камеры ускорителя $\sim 5-10\%$, потери на элементах системы вывода $10-15\%$, потери в ПП-30 5% .

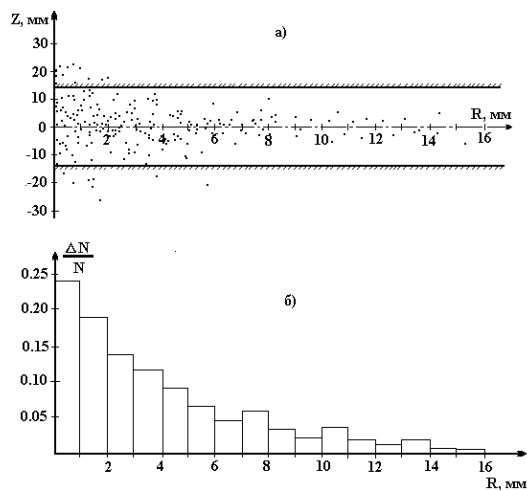


Рис. 14. Распределение частиц в апертуре СМ-18: а) эффективный поперечный размер пучка; б) горизонтальное распределение плотности частиц.

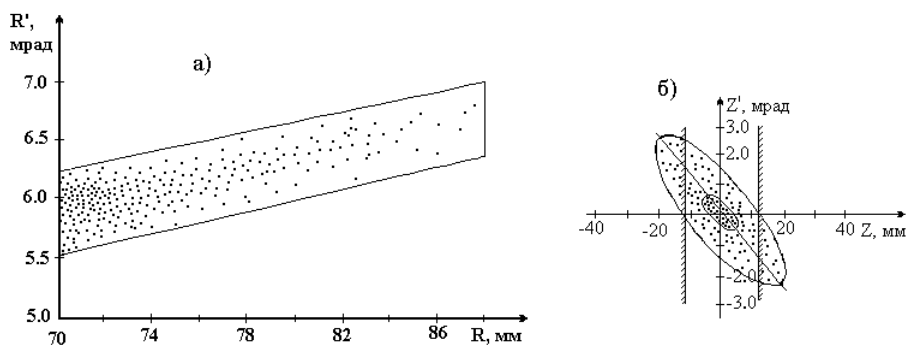


Рис. 15. Фазовый объем пучка, заброшенного в аперттуру СМ-18: а) горизонтальный; б) вертикальный. Внутри показан фазовый объем невозмущенного пучка. Заштрихованы границы вертикальной аперттуры.

В результате, при данной “геометрии” эксперимента доля частиц, выводимых в канал, может составить 5–10% от интенсивности сбрасываемых на мишень протонов. Экспериментально в канале получена интенсивность пучка $\sim 3 \cdot 10^{10}$ частиц при сбросе $\sim 6 \cdot 10^{11}$ протонов на мишень, что со-

гласуется с приведенными оценками. Измеренные профили пучка в районе внешних мишеней и на экспериментальной установке оказались в хорошем согласии с расчетами.

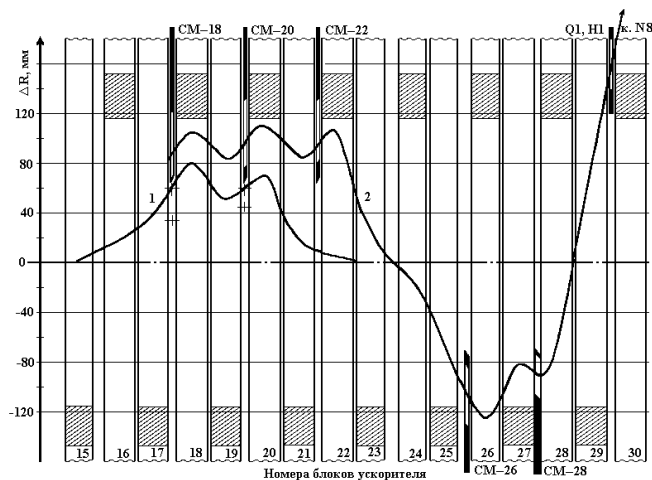


Рис. 16. Схема вывода упругорассеянных протонов. 1 — локальный бамп; 2 — трасса вывода; “+” — положение центра тяжести пучка при НМВ (вверху) и при выводе с помощью резонанса $3Q_r = 29$ (внизу).

Таким образом, в результате осуществления НМВ на ускорителе ИФВЭ был заполнен диапазон интенсивностей выводимых пучков $10^7 \div 10^{11}$ частиц за цикл, ранее недоступных для физических экспериментов, и обеспечено выполнение экспериментальной программы установки ФОДС на канале 8. Вывод протонов и первые эксперименты осуществлялись при этом последовательно с работой внутренних мишеней каналов 2 и 4, что более чем вдвое сокращало длительность вывода пучков для всех экспериментов. Задача дальнейшего повышения эффективности использования пучка и реализации совмещенных режимов, которые обеспечивали бы максимальную (≥ 1.7 с) растяжку пучков для всех потребителей, оставалась актуальной.

Считалось, что основное препятствие решению такой задачи на У-70 — это искажение поля на участке вывода из-за работы систем наведения пучка на мишени каналов 2 и 4 (основных потребителей пучков вторичных частиц), расположенных соответственно в блоках 24 и 27. Расчеты НМВ протонов с внутренних мишеней этих каналов показали принципиальную возможность совмещения условий вывода. Рассчитанный режим был ре-

ализован и являлся основным, обеспечивая высокое качество временной структуры и в два раза большую длительность растяжки пучков для экспериментов. Иллюстрация сказанного — **рис. 17**.

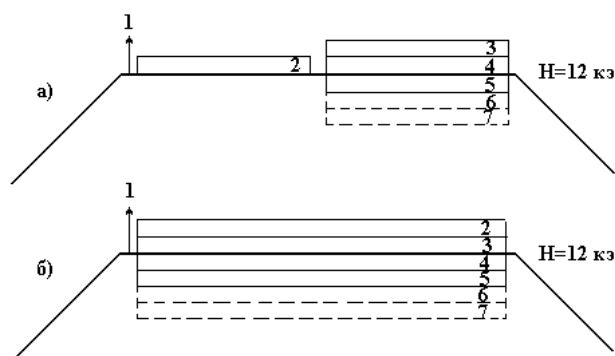


Рис. 17. Иллюстрация совместной работы НМВ (2) и внутренних мишеней (3–7):
а) последовательный; б) параллельный; 1 – БВ.

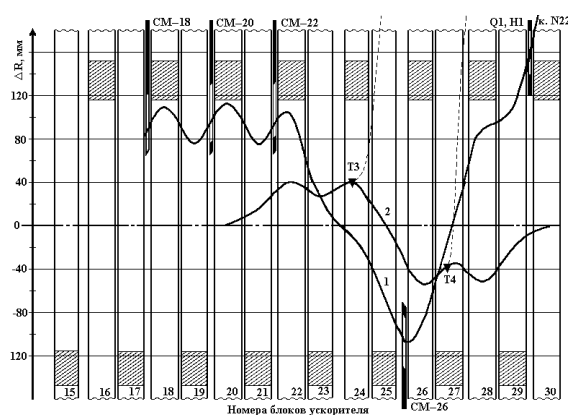


Рис. 18. Схема одновременного вывода частиц. 1 — трасса вывода упругорассеянных протонов; 2 — искажение орбиты при наведении пучка на мишени; пунктир — трассы вывода вторичных частиц.

На **рис. 18** приведена схема одновременного вывода упруго рассеянных протонов и вторичных частиц с внутренних мишеней каналов 2 и 4. Отличие этой схемы от реализованной ранее (см. рис. 16) в том, что

последним элементом, осуществляющим вывод пучка из ускорителя, является не СМ-28, а новый СМ-26, установленный вместо септум-магнита БВ. Выведенный пучок сфокусирован в районе внешних мишеней с параметрами, удовлетворяющими требованиям его дальнейшей транспортировки, и эффективностью $\geq 25\%$.

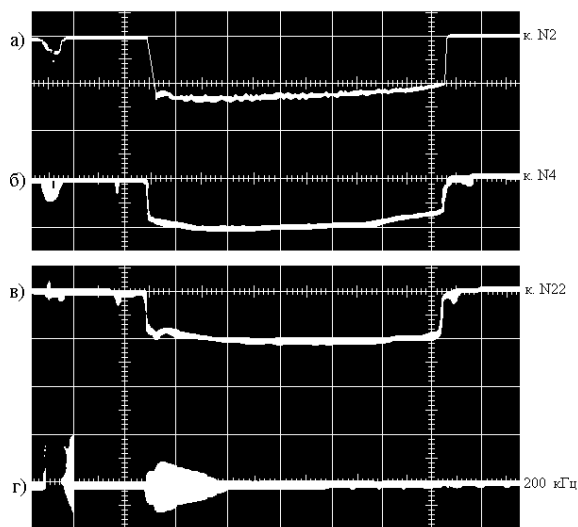


Рис. 19. Осциллограммы временной структуры при одновременной работе НМВ и каналов вторичных частиц после БВ: а, б — сигналы мониторов вторичных частиц каналов 2 и 4; в, г — сигналы монитора протонов, выводимых в канал 22 и затухания ВЧ-структуры 200 кГц, обусловленного работой тонкой мишени. (0.2 с/клетку.)

Экспериментальные результаты осуществления новых режимов вывода представлены на рис. 19 осциллограммами временной структуры выводимых частиц. Показана временная структура пучков при одновременном выводе вторичных частиц в каналы 2 и 4 и первичных протонов на установки ФОДС-2 (канал 22) или СФИНКС (канал 21). Высокое качество временной структуры и подавление ВЧ-пульсаций 200 кГц обусловлены работой тонкой углеродной мишени (см. главу 1).

Следует отметить особенности обеспечения пучками установки СФИНКС:

1. В проектном варианте протонные пучки интенсивностью $10^6 \div 10^9$ частиц за цикл предполагалось получать, применяя дифракционное рассеяние пучка, выводимого резонансным способом, интенсивностью $\sim 5 \cdot 10^{11}$ ча-

стиц за цикл на мишенях, установленных в магнитах канала. Этот способ, обеспечивая решение данной задачи, обладает существенным недостатком: большие запланированные потери интенсивности ведут к неоправданному облучению элементов канала и появлению на них опасных радиационных нагрузок. Избежать неоправданно высоких потерь частиц в канале удалось с помощью НМВ, обеспечившего вывод протонов необходимой интенсивности при более высоком качестве временной структуры. Интенсивность легко регулируется глубиной заброса частиц в первый септум-магнит У-70.

2. Как видно из рис. 18, мишень канала 4 (T_4) может являться источником упруго рассеянных протонов с углами рождения 5–7 мрад, что обуславливает интенсивность пучка в канале $21 \sim 5 \cdot 10^6$ частиц за цикл. Этот режим привлекателен тем, что без септум-магнитов и бампов заброса обеспечивает наиболее эффективное использование пучка с внутренних мишеней. Длительность вывода пучка в канал 21 равна длительности вывода вторичных частиц, что было невозможно с СМ-18, длительность импульса тока которого ≤ 1.0 с. Этот способ вывода обеспечил завершение научной программы установки СФИНКС в условиях, когда последний из дефлекторов СМ-26 вышел из строя в одном из сеансов У-70 в 1999 г.

Основное назначение установки Комплекс меченых нейтрино (КМН), расположенной на канале 23, — проведение экспериментов на пучках нейтрино с применением методики мечения. Используется пучок протонов интенсивностью $(5-8) \cdot 10^{12}$ частиц за цикл, выведенный из ускорителя с помощью резонансного метода раскачки пучка. Однако возможности установки КМН позволяют исследовать редкие распады К-мезонов, для чего необходим пучок ускоренных протонов интенсивностью $\sim 10^{10}$ частиц/цикл, но с максимальной длительностью, высокой стабильностью параметров и качеством временной структуры, достижимым лишь при работе внутренних мишеней.

Работа любой экспериментальной установки с пучком “низкой” интенсивности, почти не имеющим временной модуляции, оказывается более эффективной, чем при выводе пучка высокой интенсивности, но с худшими параметрами временной структуры. Так, например, для установки КМН при примерно одинаковой эффективности набора статистики эти интенсивности отличаются на два порядка: $\sim 10^{10}$ для “хорошей” (пульсации $\leq 10\%$) временной структуры и $\sim 10^{12}$ протонов/цикл для структуры с высокими ($\geq 50\%$) пульсациями интенсивности в течение вывода.

За счет использования электростатического дефлектора обеспечен вывод до $9 \cdot 10^{10}$ протонов/цикл, что примерно на порядок выше достигнутого при выводе, например в канал 22, для установок ФОДС-2 и СВД. Достоин-

ство использования НМВ в данном случае в том, что он дал возможность начать новую программу исследований на установке КМН, обеспечив вывод ускоренных протонов одновременно с генерацией вторичных частиц для 3–4 других, уже ведущихся экспериментов. Это дополнительно повышает эффективность использования ускорителя на 25–30%, а высокие качество и стабильность параметров выводимого пучка не могут быть получены другими известными методами вывода.

В процессе исследований требовалось изучить принципиальную возможность вывода пучка интенсивностью $\sim 10^{10}$ протонов/цикл, а также получить максимальную интенсивность с использованием электростатического дефлектора.

На первом этапе НМВ осуществлялся последовательно с высокоинтенсивным РМВ, занимавшим первую половину плоской части магнитного цикла, и одновременно с генерацией вторичных частиц внутренними мишенями для экспериментальных установок каналов 2; 4; 18; 5Н. Было достигнуто значение выводимой интенсивности $\sim 10^{10}$ протонов/цикл, при этом после мишени установки КМН зафиксировано $\sim 10^6$ К-мезонов, что было достаточно для начала исследований с полученным пучком по новой программе. На втором этапе вывод протонов осуществлялся в режиме максимальной длительности взаимодействия ускоренного пучка с внутренними мишенями на плоской части магнитного цикла 1.7 с.

Полная схема вывода приведена на **рис. 20**, где кривыми 1, 1' показаны смещения орбиты пучка в районе ЭД-106, септум-магнитов и мишеней (T_1, T_2) перед началом раскачки, а кривыми 2, 2' – трасса пучка, выводимого в канал 23 после заброса в ЭД-106. Рабочее значение интенсивности, выведенной из ускорителя, составляло $\geq 5 \cdot 10^{10}$ протонов/цикл, на установке КМН измерялось $\sim 5 \cdot 10^6$ К-мезонов.

Как отмечалось выше, после получения практически полной длительности вывода и достижения интенсивности пучка, достаточной для начала исследований, фактором, определяющим эффективность набора статистики в новом эксперименте, являлось качество временной структуры выводимого пучка. В нашем случае качество пучка иллюстрирует **рис. 21**, на котором представлен частотный спектр временной структуры пучка протонов, выводимых одновременно с пучками вторичных частиц. Разложение получено с помощью анализатора спектра, использующего быстрое фурье-преобразование. Исследованы два случая, когда в раскачке пучка участвует Ве мишень толщиной $\sim 0.1L_N$ (рис. 21а), либо мишень из углеродной ткани толщиной $\sim 10^{-3}L_N$ (рис. 21б). Видно, что при работе тонкой мишени влияние всех пульсаций (в том числе и низкочастотных) сильно подавлено. Видно также, что в спектре присутствуют частоты ~ 65

и 200 Гц, но, как уже отмечалось, их амплитуды настолько малы, что не влияют на качество экспериментов.

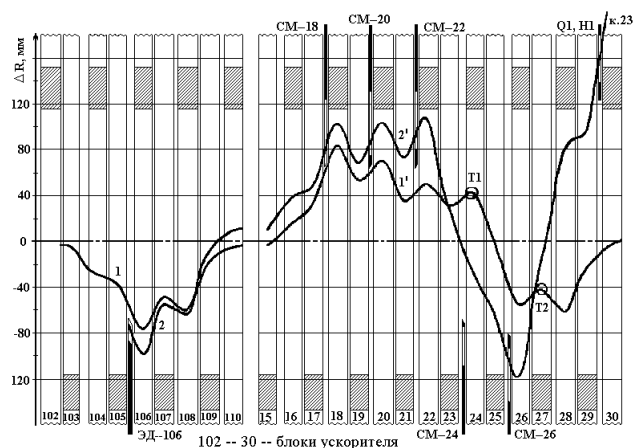


Рис. 20. Полная схема вывода протонов: ЭД-106, СМ-18; 20; 22; 26 — электростатический и магнитные дефлекторы системы вывода; Q_1, H_1 — элементы транспортировки; T_1, T_2 — внутренние мишени каналов 2 и 4 на участке вывода.

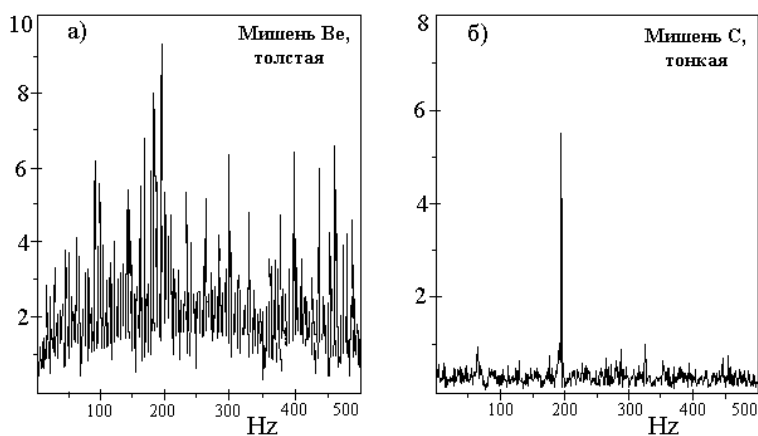


Рис. 21. Частотный спектр временной структуры протонов, выводимых одновременно с пучком вторичных частиц: а) в качестве T_1 используется "толстая" Ве мишень, б) T_1 — тонкая углеродная ткань.

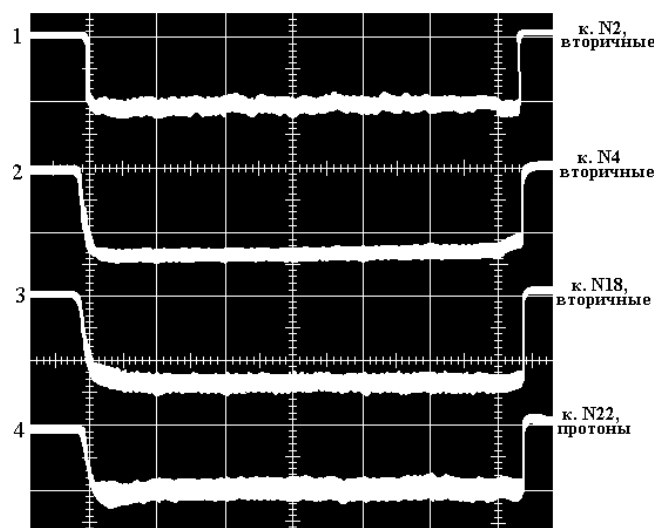


Рис. 22. Осциллограммы временной структуры пучков вторичных частиц и первичных протонов, выводимых в разные направления (0.2 с/клетку.)

Наконец, на **рис. 22** приведены осциллограммы временной структуры пучков вторичных частиц, выводимых в направления каналов 2; 4 и 18 (лучи 1, 2, 3), и первичных протонов, выводимых одновременно в канал 22 на установку ФОДС-2. В целях упрощения, сигналы мониторов двух мишеней, работавших “в тени”, не показаны.

Реализованы также другие возможности одновременной работы НМВ с внутренними мишенями.

1. Для установки ГАМС-4 π потребовалось существенное повышение интенсивности пучка π^- -мезонов³, что могло быть достигнуто при работе мишеней блока 27 на положительных координатах. Это входило в противоречие с существующим режимом работы НМВ при отрицательных координатах М27. Интенсивность пучка π^- -мезонов в этом режиме не превышала $5 \cdot 10^6$ частиц/цикл. Расчеты показали, что новый режим может быть реализован, если удастся скомпенсировать искажение траектории пучка при НМВ, для чего необходима коррекция магнитных полей в двух блоках на участке вывода. Такая коррекция была осуществлена, и требуемый режим одновременного вывода ускоренных протонов и вторичных π^- -мезонов реализован. Максимальное число π^- -мезонов на установке

³Ю.Д.Прокошкин, частное сообщение.

ГАМС в этом режиме составило $1.3 \cdot 10^7$ за цикл ускорителя, что почти в 3 раза превышает их интенсивность в прежнем режиме работы. Возможность одновременной работы других потребителей и качество выводимых пучков сохранились.

2. Получены первые результаты НМВ пучка ускоренных протонов с использованием мишеней из W и Cu. Была использована другая схема вывода, где первым дефлектором являлся септум-магнит ПП-24 (СМ-24) с толщиной токовой перегородки ~ 3 мм. Мишени устанавливались перед септум-магнитом со сдвигом по азимуту ~ 0.5 радиана (см. рис. 23). Это позволяло забросить в апертуру СМ-24 часть частиц пучка сразу после рассеяния на мишени.

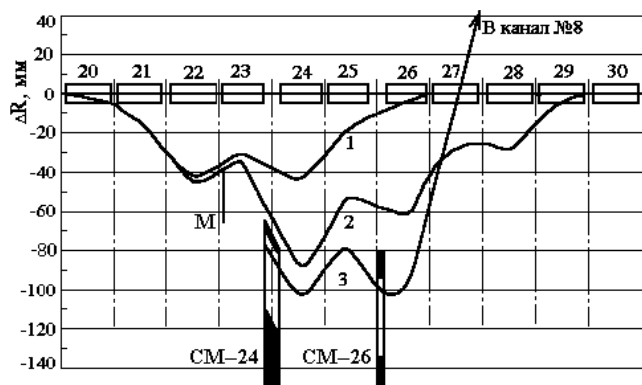


Рис. 23. Схема эксперимента по выводу рассеянных протонов из У-70.

В данном эксперименте при сбросе на рассеивающую мишень 10^{12} протонов интенсивность выведенного пучка составила $\geq 3 \cdot 10^{11}$ за цикл. Возможно увеличение выводимой интенсивности, если обеспечить сдвиг фаз между мишенью-рассеивателем и первым дефлектором $\approx \pi/2$ и использовать септум-магнит с тонкой (< 1 мм) токовой перегородкой или электростатический дефлектор. Ожидается, что в такой схеме возможен вывод пучка интенсивностью до 10^{12} протонов/цикл с хорошей временной структурой.

В заключение показана перспективность применения НМВ как на У-70, так и на других ускорителях на более высокие энергии. Применяя мишени-рассеиватели с определенными параметрами, можно добиться преобладания процессов рассеяния частиц над процессом поглощения в материале мишени. Это будет способствовать эффективному забросу частиц в

апертуру первого выводного элемента, как правило, электростатического deflectора, и выводу их из ускорителя.

Для существующей магнитной структуры ускорителя ИФВЭ возможно достижение эффективности $\geq 90\%$, что хорошо согласуется с результатами оценок эффективности такого вывода для ускорителей FNAL ($\sim 98\%$) и CERN ($\sim 95\%$), выполненных ранее соответственно A.W.Maschke и Ch.Steinbach, а также для накопителя протонов Московской мезонной фабрики ИЯФ РАН (97%) согласно независимого анализа специалистов НИИЭФА⁴. Такой метод вывода не был реализован на Тэватроне и SPS в силу причин, связанных с изменением проектов уже строившихся ускорителей.

Оценки интенсивности вывода из У-70, сделанные исходя из условий термической стойкости мишеней-рассеивателей, показывают, что возможен вывод до 10^{13} протонов за цикл при минимальной опасности радиационного повреждения оборудования. Увеличение времени вывода до 2 с (на весь “стол” магнитного цикла У-70) будет способствовать облегчению температурного режима мишени-рассеивателя. Реальная возможность осуществить НМВ из У-70 с высокой эффективностью может появиться после изготовления и установки соответствующего оборудования.

Третья глава диссертации посвящена исследованию возможности **использования эффекта каналирования** на ускорителях заряженных частиц высоких и сверхвысоких энергий. Осуществление многооборотного вывода пучка протонов с энергией 70 ГэВ из ускорителя ИФВЭ явилось первым шагом в направлении практического применения этого интересного метода вывода, обеспечившего завершение исследований неизвестного ранее физического явления — “скейлинговой асимметрии” — на установке ПРОЗА.

Вывод протонов осуществлен с помощью монокристалла Si, установленного в вакуумной камере У-70 и изогнутого на угол 80 мрад. Обеспечено равномерное взаимодействие пучка и монокристалла в течение всей плоской части магнитного цикла на координатах, существенно более далеких, чем рабочие координаты “обычных” внутренних мишеней. На установке ПРОЗА получено до 10^7 протонов, эффективность вывода в первых экспериментах достигала $\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$. Вывод протонов осуществляется **одно-временно** с выводом вторичных частиц, генерируемых поликристаллическими мишенями, в другие каналы.

Известно, что расположение атомов в твердом теле определяет свойства вещества, а в монокристалле — величину взаимодействия налетающей ча-

⁴И.А.Шукейло и др. Авторское свидетельство N1207386 от 15.06.1987.

стицы с атомами мишени. Каналирование — это ориентационный эффект. Оно возникает, когда направление движения пучка совпадает с направлением главной симметрии кристалла, под которым понимается одно из свободных от атомов направлений вдоль атомной цепочки. Термин “каналирование” позволяет наглядно представить атомные ряды и плоскости ориентирами, которые направляют движущиеся частицы вдоль “каналов” между цепочками и плоскостями.

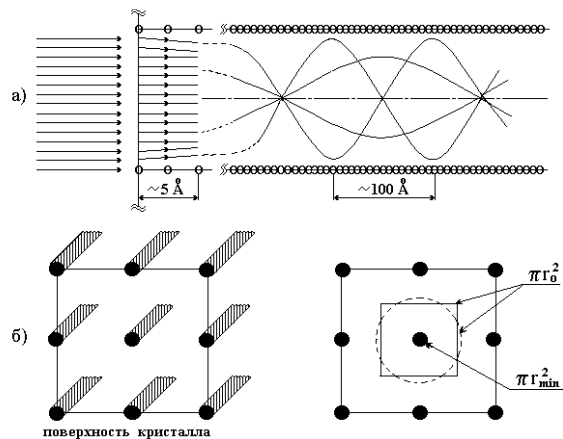


Рис. 24. Иллюстрация процесса каналирования (а) и вид спереди на кристалл (б).

Рис. 24 иллюстрирует процесс каналирования, в котором часть пучка направляется по каналам, образованным рядами атомов. Траектория каналированной частицы такова, что она испытывает скользящие столкновения с осями (осевое каналирование) или плоскостями (плоскостное каналирование) кристалла и направляется за счет рассеяния на малые углы, не приближаясь к атомным ядрам ближе, чем 0.1Å .

Расчеты и исследования вывода протонов из У-70 на установку ПРОЗА велись для двух случаев:

- Показать возможность вывода пучка протонов независимо от работы других установок (последовательный вывод).
- Обеспечить вывод протонов с помощью монокристалла одновременно с выводом вторичных частиц (параллельный вывод), сохранив достигнутый коэффициент одновременности.

Схема, поясняющая возможность осуществления вывода ускоренных протонов с помощью изогнутого кристалла и последующую ее реализацию, представлена на **рис. 25**.

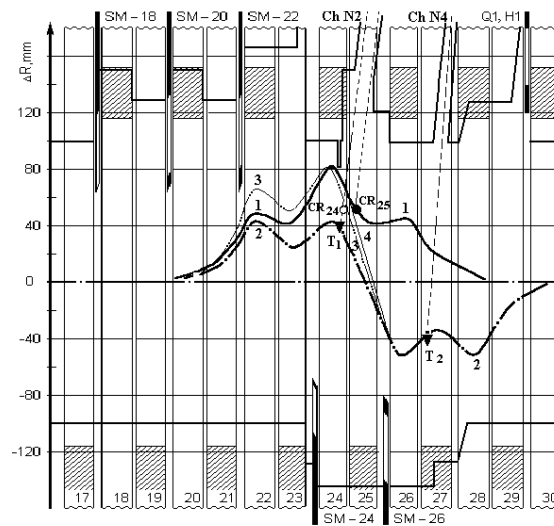


Рис. 25. Схема одновременного вывода протонов и вторичных частиц из У-70: 1-1, 2-2 — бампы орбиты для наведения протонов на кристалл или на мишени T_1 и T_2 ; 1-4-2, 1-3-2 — бампы орбиты при одновременном выводе протонов с помощью CR_{25} или CR_{24} и вторичных частиц с мишени T_2 .

Наиболее важные зависимости, характеризующие эффективность вывода протонов с помощью кристаллического дефлектора блока 25 У-70, приведены на **рис. 26**. Кривые 1 и 2 — зависимости числа частиц в канале от интенсивности взаимодействующего с кристаллом пучка соответственно для случаев, когда наведение пучка на кристалл осуществляется бампом канала 2 вместе с дополнительным бампом, формируемым четными блоками 22, 28, либо нечетными — 21, 27. Второй режим оказывается более благоприятным для обеспечения одновременной работы кристаллического дефлектора с внутренними мишенями других каналов. Кривые 3 и 4 рис. 26 — зависимости эффективности вывода протонов соответственно кривым 1 и 2.

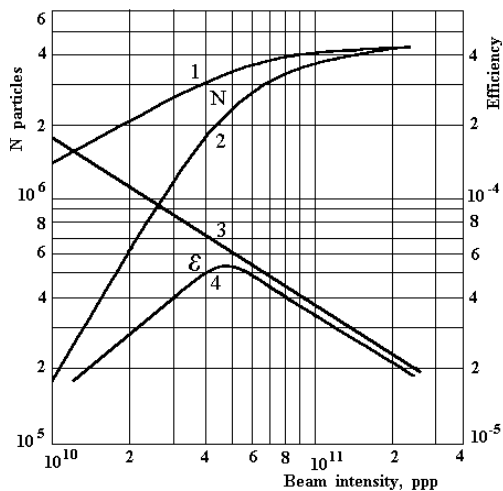
Представление о длительности и качестве пучков при одновременном выводе ускоренных протонов и вторичных частиц из У-70 для разных экспериментов и в разные направления дает **рис. 27**.

Высокое качество временной структуры выводимых пучков достигается благодаря предварительному рассеянию пучка тонкой внутренней мишенью перед наведением на монокристалл. Благодаря использованию монокристалла, на установке ПРОЗА получен пучок протонов с лучшими пара-

метрами пространственно-угловых распределений по сравнению с пучком π^- -мезонов с внутренней мишени.

Возможность сравнить пространственные и угловые распределения пучка протонов с энергией 70 ГэВ, выведенного с помощью изогнутого монокристалла, и π^- -мезонов с энергией 40 ГэВ, полученных с внутренней мишени блока 24, представлена на **рис. 86** и **87** диссертации. Монокристалл позволяет получить пучок протонов в два раза более узкий и с меньшей угловой расходимостью по сравнению с пучком π^- -мезонов, что полностью соответствует требованиям новых экспериментов на установке ПРОЗА.

Рис. 26. Зависимости числа частиц в канале и эффективности вывода протонов от интенсивности первичного пучка, взаимодействующего с монокристаллом в двух режимах: 1, 3 — наведение осуществляется с помощью блоков 20, 26 и 22, 28; 2, 4 — с помощью блоков 20, 26 и 21, 27.



Идеи практического использования эффекта каналирования для вывода пучков из ускорителей получили дальнейшее развитие, что нашло отражение в следующих результатах диссертации:

- исследования и осуществление экспериментального вывода 70-ГэВ протонов на установку ВЕС (канал 4Д);
- повышение эффективности вывода протонов с энергией 70 ГэВ на установку ПРОЗА (канал 14);
- исследования и осуществление экспериментального вывода 50-ГэВ протонов на установку СИГМА (канал 2Б);
- повышение с помощью монокристалла Si интенсивности пучка протонов при нерезонансном медленном выводе;
- определение перспектив использования изогнутых монокристаллов на У-70.

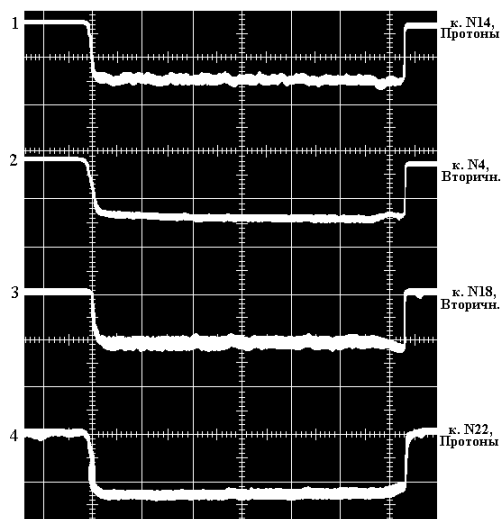


Рис. 27. Осциллограммы одновременного вывода из У-70 различных частиц для разных экспериментов. 1, 4 – вывод протонов с энергией 70 ГэВ с помощью кристалла блока 25 на установку ПРОЗА и НМВ на ФОДС-2 соответственно; 2, 3 – вывод пучков вторичных частиц с внутренних мишеней в каналы 4 и 18 (0.2 с/клетку).

В расчетном плане исследована возможность вывода пучка протонов с помощью изогнутого монокристалла на установку ВЕС для исследований образования и распада чармованных частиц. Показано, что вывод протонов на эту установку возможен при угле изгиба монокристалла, установленного в блоке 27 У-70, 83–89 мрад.

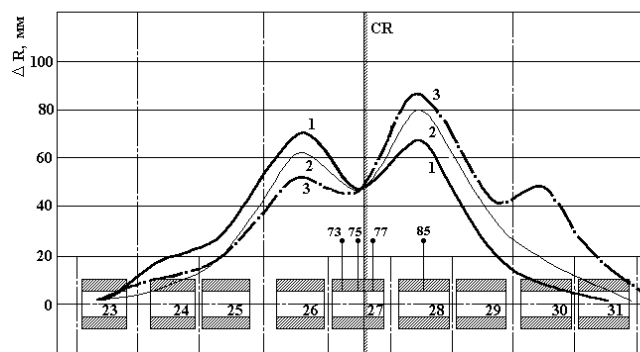


Рис. 28. Локальные искажения орбиты для наведения пучка на кристалл, формируемые работой бампа 24–30 вместе с бампами 23–29, 25–31 и 26–32 (кривые 1–1, 2–2, и 3–3). Азимут установки кристалла отмечен заштрихованной линией.

Разработанная схема наведения пучка на монокристалл (см. **рис. 28**) позволяет ослабить требования к взаимной юстировке пучка и монокри-

сталла и упростить конструкцию дистанционно-управляемого гониометра. С появлением в канале 4 протонного пучка расширяются экспериментальные возможности не только установки ВЕС, но и расположенных на нем физических установок ГАМС, ИСТРА. Осуществлен экспериментальный вывод протонов на установку ВЕС. Основные результаты согласуются с более ранними предсказаниями.

При прямом наведении пучка на изогнутый монокристалл, установленный камере У-70, эффективность вывода достигает $\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$ и заметно снижается с ростом интенсивности взаимодействующих с монокристаллом частиц. Максимально достигнутое число частиц $\sim 4.5 \cdot 10^6$ практически не увеличивалось вплоть до наведения на монокристалл $\geq 10^{11}$ протонов. Как оказалось, эффективность вывода может быть значительно увеличена за счет упругого рассеяния ускоренных протонов на тонкой внутренней мишени, установленной перед кристаллом. Число частиц в канале удваивается и достигает 10^7 протонов.

Конкретные условия вывода в данном эксперименте представлены на рис. 29. Показаны фазовые эллипсы для блоков 24 (1', 2) и 25 (1, 2'), в которых установлены мишень и кристалл. Функции $\Phi(R)$ показывают распределение частиц в пучке, нормализованное на 10^{12} протонов. Координаты кристалла и тонкой мишени также видны на рис. 29.

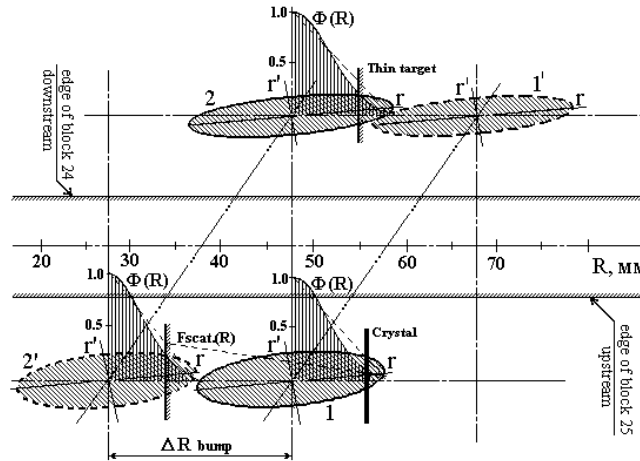


Рис. 29. Геометрия эксперимента по рассеянию частиц тонкой мишенью перед выводом с помощью кристалла магнитного блока 25 и некоторые характеристики пучка.

Предварительные оценки эффективности вывода (порядка величины) в канал 14 при рассеянии пучка тонкой мишенью, в которых не были учтены потери частиц из-за неупругих взаимодействий протонов с мишенью, показали, что она составляет $\sim 0.7\%$. С учетом эффективности внутренней мишени ($\sim 70\%$) эффективность вывода протонов изогнутым монокристаллом оказывается $\sim 2\%$.

Теоретический анализ показал, что в данном эксперименте просматривается аналогия с вариантом установки кристалла в местах экстремумов β -функции, за исключением того, что оптимальное значение $x'_0 \neq 0$, а определяется значением амплитуды бетатронных колебаний частиц, взаимодействующих с кристаллом. Как и в том случае, максимальная эффективность вывода достигает значения ε_{max} и составляет $\approx 2\%$.

Реальная эффективность вывода может оказаться несколько выше после реконструкции вакуумной камеры У-70 и головной части канала. Порядок ожидаемого значения эффективности сопоставим величиной, достигнутой на SPS CERN ($\sim 10\%$) при отклонении на 7 мрад очень узкого (± 5 мкрад) пучка с энергией 450 ГэВ. При такой эффективности имеет смысл говорить об использовании рассмотренного метода для вывода $\sim 10^8$ протонов/с, что необходимо для эксперимента SFT(E01-14) на SSC.

В качестве модельного эксперимента был исследован вывод протонов изогнутым монокристаллом из Тэватрона (FNAL), о результатах осуществления которого сообщается ниже.

В одном из сеансов 1992 г. У-70 часть времени работал с пониженной энергией ускоренного пучка — 50 ГэВ. Так как данные о каналировании и выводе протонов с энергией 50 ГэВ в мировой литературе отсутствовали, было интересно осуществить вывод такого пучка с помощью изогнутого монокристалла. Пучок был выведен на установку СИГМА (канал 2Б) для методических исследований. Так как каналы 2 и 14 имеют общую головную часть, вывод протонов в канал 2 осуществлялся с помощью того же монокристалла Si, который установлен в блоке 25 У-70 и используется для вывода протонов с энергией 70 ГэВ на установку ПРОЗА. Схема каналов приведена на **рис. 30**.

В режиме прямого наведения пучка на монокристалл $\sim 10^{11}$ частиц на установке СИГМА зафиксирована интенсивность $4.6 \cdot 10^6$ протонов, т.е. эффективность вывода составила $\sim 4.5 \cdot 10^{-5}$, что соответствует значению эффективности, полученному ранее. При увеличении интенсивности взаимодействующего с кристаллом пучка эффективность вывода заметно снижалась. Предполагается, что это обусловлено динамикой наведения вместе с термическими, радиационными и другими эффектами в кристаллах при высоких плотностях первичного пучка. Предварительное рассеяние пучка

тонкой мишенью перед забросом протонов на кристалл дает увеличение эффективности вывода и при энергии 50 ГэВ. Однако по сравнению со случаем удвоения интенсивности при выводе 70–ГэВ протонов в канал 14, в канале 2 зафиксировано увеличение интенсивности лишь на $\sim 30\%$.

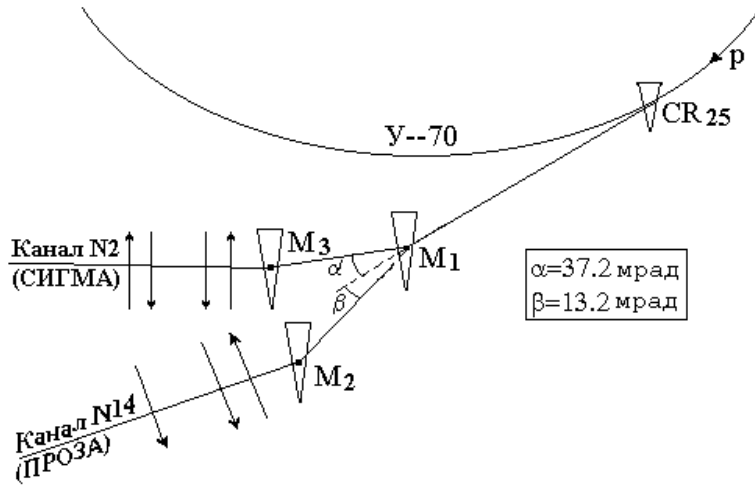


Рис. 30. Схема вывода пучка на экспериментальную установку ПРОЗА (канал 14). Показано также направление канала 2.

Зависимость числа частиц с энергией 50 ГэВ, выведенных из ускорителя с помощью изогнутого кристалла, от радиальной координаты тонкой мишени приведена на **рис. 31** (кривая 2). Кривая 1 на рис. 31 показывает аналогичную зависимость для энергии первичного пучка 70 ГэВ. $N_{max}(CR)$ обозначает максимальное число частиц, выведенных из ускорителя при прямом наведении пучка на монокристалл, примерно одинаково в обоих случаях. Анализ рис. 31 показывает, что численные значения основных характеристик пучков протонов, выведенных при энергиях 50 и 70 ГэВ: максимумов интенсивности, ее “начальных” уровней $(N_{in})_E$ и градиентов роста $(dI/dR)_E$ примерно пропорциональны коэффициенту $\gamma_E = 70/50$, выражающему отношение энергий первичного пучка.

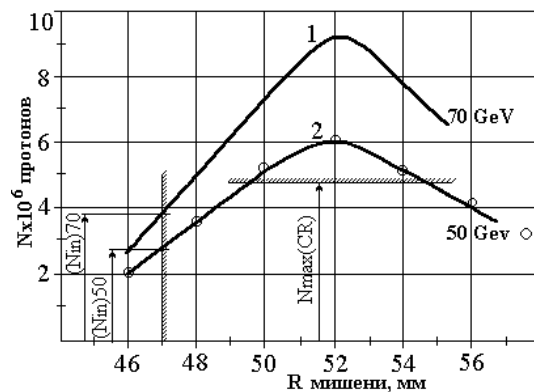


Рис. 31. Число частиц, выведенных из ускорителя изогнутым монокристаллом при рассеянии пучка от координаты тонкой мишени. 1 — энергия 70 ГэВ, 2 — 50 ГэВ.

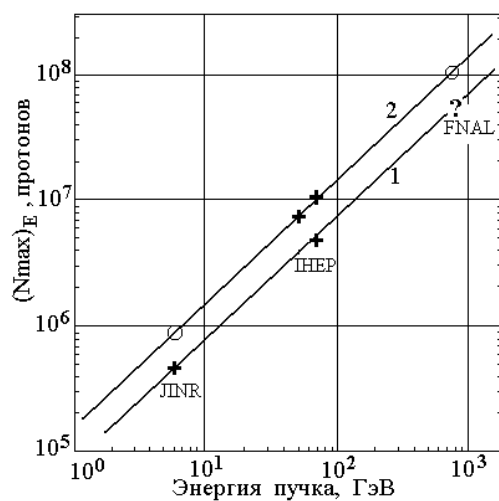


Рис. 32. Зависимости интенсивности пучка, выводимого изогнутым монокристаллом от энергии. 1 — при прямом наведении пучка на кристалл, 2 — после рассеяния тонкой мишенью.

Рис. 32 иллюстрирует зависимости максимальной интенсивности, которую можно вывести с помощью монокристалла, от энергии ускоренного пучка для случаев прямого наведения пучка на кристалл (кривая 1) и после рассеяния тонкой внутренней мишенью (кривая 2). Крестом отмечены экспериментально полученные на У-70 и в ОИЯИ значения. Виден эффект увеличения интенсивности вывода пучка с помощью изогнутого монокри-

сталла при предварительном рассеянии его тонкой внутренней мишенью. Эффективность вывода, достигаемая при таком способе, может значительно превышать эффективность вывода при прямом наведении пучка на кристалл. Например, при энергии Тэватрона (800 ГэВ) возможен вывод $\sim 10^8$ протонов, что необходимо для новых экспериментов на фиксированной мишени как на Тэватроне, так и на сверхпроводящем суперколлайдере SSC, проектируемом в США.

Математическое моделирование процесса раскачки пучка тонкой мишенью перед забросом на кристалл показало, что случай, когда рабочая координата мишени–рассеивателя $R > 0$ (соответствует реальным условиям ее работы), является наиболее благоприятным для захвата в режим каналирования, так как угловая расходимость пучка частиц, имеющих большие амплитуды, существенно уменьшается, приближаясь к значению критического угла каналирования кристалла при 70 ГэВ $\psi_c \sim \pm 25$ мкрад. Достоинством данного способа раскачки пучка является то, что при этом не затрагивается ядро пучка: мишень постепенно углубляется, взаимодействуя с периферией в течение времени, задаваемого темпом раскачки. Такой способ вывода может быть использован на ускорителях–коллайдерах на сверхвысокие энергии.

Нерезонансный медленный вывод (НМВ) протонов из У–70 обеспечил возможность проведения экспериментов с адронными пучками на установках ФОДС–2, СВД и СФИНКС при интенсивности выведенного пучка $10^6 \div 10^9$ протонов/цикл. При параллельном использовании мишеней, генерирующих вторичные частицы для установок каналов 2(14); 4; 18 и др., интенсивность НМВ $\sim 10^9$ протонов за цикл близка к предельной из–за большой (≥ 0.5 мм) толщины перегородки первого септум–магнита системы вывода, установленного в ПП–18. Как оказалось, с помощью изогнутого кристалла Si, установленного перед СМ–18, можно увеличить число выведенных частиц. Возможности данного режима подтверждают существование других способов использования изогнутых монокристаллов для вывода протонов для физических экспериментов из ускорителей на высокие энергии. Ниже описана схема вывода и приводятся полученные результаты.

Монокристалл Si длиной по пучку 3 см был изогнут на угол ~ 2.5 мрад вдоль кристаллографической оси (110) и установлен за 40 см до СМ–18. Толщина кристалла 2 мм. Взаимное расположение септум–магнита и изогнутого монокристалла показано на **рис. 33**.

Такая схема позволяла частицам, которые могли попасть на нож септум–магнита, но были захвачены в режим каналирования, получить смещение при однократном прохождении:

$$\Delta R_{CR} = L \cdot \Theta_{CR} \approx 1 \text{ мм},$$

где L — расстояние от кристалла до септума; Θ_{CR} — угол изгиба монокристалла. При толщине ножа СМ-18 ~ 0.5 мм этого смещения достаточно, чтобы частицы, идущие параллельно септуму и захваченные в режим каналирования, были заброшены в его апертуру.

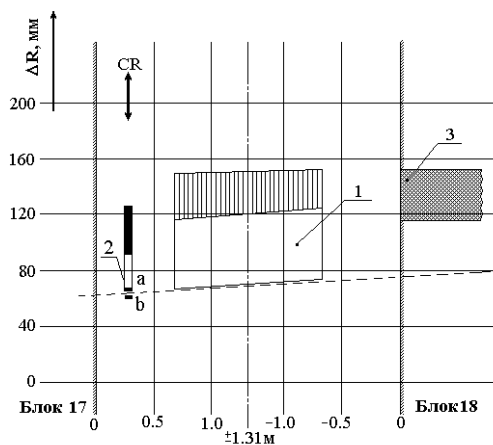


Рис. 33. Расположение септум-магнита и кристалла в ПП-18. 1 — апертура СМ-18; 2 — кристалл с механизмом ввода-вывода; 3 — зона нелинейного поля; а, b — положения кристалла относительно септума. 0 — края магнитных блоков, пунктир — огибающая пучка.

На **рис. 34** показана зависимость числа частиц, выведенных в канал 22, от положения изогнутого кристалла относительно центра вакуумной камеры У-70 при разных уровнях выводимой интенсивности (кривые 1, 2, 3 соответственно). Видно, что по мере движения кристалла к центру камеры интенсивность выводимого пучка увеличивается и достигает некоторого максимума. Прирост интенсивности в зоне максимума достигает $\sim 3 \cdot 10^8$ протонов, что составляет $\sim 30\%$ при выводе $\sim 10^9$ протонов за цикл и порядка 10% при интенсивности $\sim 3 \cdot 10^9$ протонов/цикл. Чтобы убедиться, что полученный результат обусловлен эффектом каналирования, а не простым рассеянием частиц на монокристалле, как на обычной поликристаллической мишени, были сняты аналогичные зависимости для кристалла без изгиба, установленного на том же азимуте У-70.

Результат представлен на **рис. 35**. Видно существенное различие полученных зависимостей.

Рис. 34. Зависимость интенсивности, выводимой в канал 22, от координаты изогнутого кристалла. Кривые 1, 2, 3 соответствуют разным уровням выводимой интенсивности. Координаты входа и выхода СМ-18 показаны заштрихованными линиями.

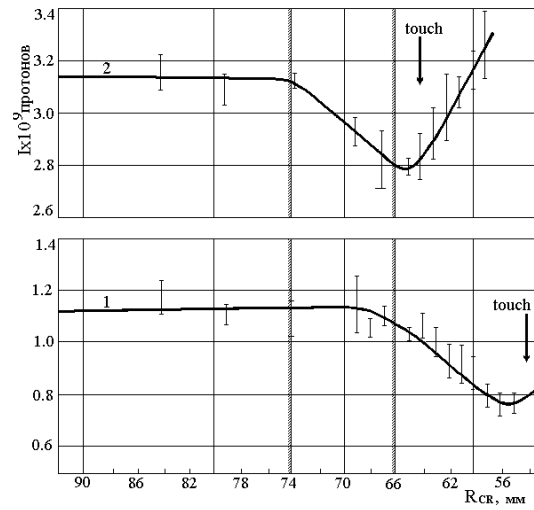
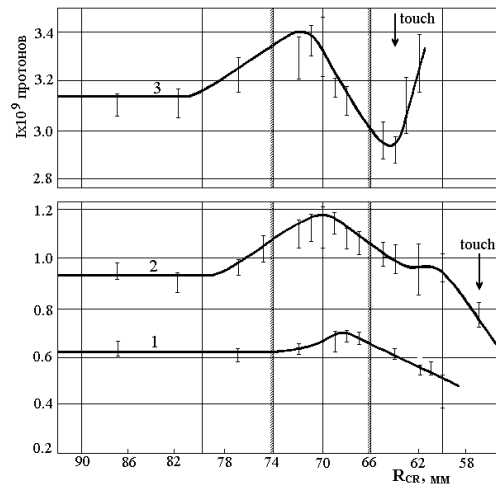


Рис. 35. Зависимость интенсивности, выводимой в канал 22 от координаты прямого кристалла, установленного перед СМ-18.

В случае изогнутого кристалла наблюдается рост интенсивности уже на координатах 80–82 мм, что в 14–16 мм от входного края септума в глубину апертуры. Прямой кристалл не дает никакого прироста интенсивности, обеспечивая лишь потери частиц, взаимодействующих с ним внутри апертуры СМ–18, увеличивающиеся по мере движения кристалла ко входному концу септума.

Дальнейшее движение кристалла за септум в камеру ускорителя приводит к дополнительным потерям частиц на наружной (ориентированной к циркулирующему пучку) стороне септума с некоторым увеличением интенсивности после касания кристаллом (показано стрелкой) плотной части пучка, еще не испытавшей раскачки мишенями. В этом случае зафиксировано сокращение в 1.5–2 раза растяжки пучков вторичных частиц, выводимых параллельно в другие каналы. Эффект увеличения выводимой интенсивности в этой схеме может быть усилен с помощью гониометра, позволяющего обеспечить оптимальные угловые соотношения между кристаллом, пучком и септум–магнитом.

Как уже сообщалось, даже при прямом использовании изогнутых монокристаллов значение эффективности вывода пучка из У–70 составляет $\sim 10^{-4}$. Это значит, что для получения на экспериментальной установке 10^6 протонов необходимо навести на кристаллический дефлектор $\sim 10^{10}$ частиц ускоренного пучка. Такая интенсивность представляет собой величину, на два порядка меньшую интенсивности, сбрасываемой на внутреннюю мишень при формировании пучков вторичных частиц. Частицы такой интенсивности содержатся фактически в гало ускоренного пучка, и могут быть легко выведены, что позволит сформировать пучок нужных размеров для высокоэффективного вывода его из ускорителя, например с помощью быстрого вывода. Как результат, использование изогнутых монокристаллов позволит значительно (по сравнению с внутренними мишенями) снизить радиационные нагрузки на оборудование ускорителя. Этот фактор будет иметь особенно большое значение для У–70, когда он станет работать с интенсивностью, в несколько раз превышающей существующую (в рамках подготовки к новым экспериментам, например, эксперименту ОКА).

Анализ существующей экспериментальной базы ИФВЭ с учетом возможностей ее трансформации под новые задачи показал, что на У–70 имеется целый ряд зон, где применение монокристаллов позволит значительно расширить возможности использования ускорителя. Наиболее перспективные из них показаны на **рис. 36** темными кружками.

В диссертации показана также возможность использования изогнутых монокристаллов для вывода частиц из ускорителей на сверхвысокие энергии.

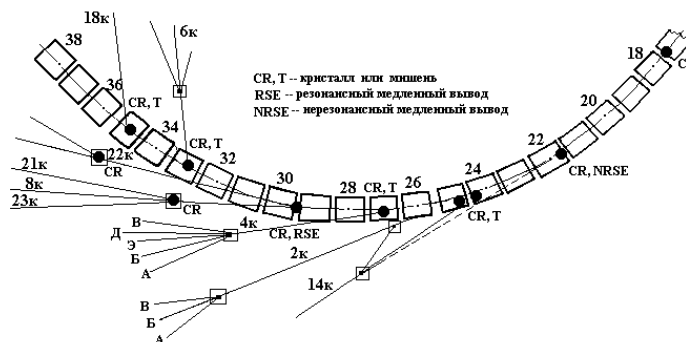


Рис. 36. Зоны перспективного использования на У-70 изогнутых монокристаллов для вывода ускоренных протонов .

Ускорители частиц сверхвысоких энергий ($E \geq 1$ ТэВ) могут работать в двух модах: с выводом пучка для фиксированных мишеней и в режиме встречных пучков (коллайдерном), при котором обеспечивается очень высокая эффективная энергия взаимодействия. В крупнейших ускорителях-коллайдерах, таких как SSC на 20 ТэВ (США), строительство которого приостановлено, и активно строящемся LHC (2x8 ТэВ, CERN) не планировалось никакой серьезной техники для вывода частиц. Тем не менее, даже относительно “слабые” выведенные пучки были бы очень полезны для тестовых экспериментов, генерации пучков вторичных частиц и проведении ряда оригинальных исследований, которые не могут быть осуществлены в “коллайдерной” моде.

Аргументы в пользу вывода протонов изогнутыми монокристаллами:

- не требуется интенсивность выше, чем в типичном режиме встречных пучков с высокой светимостью;
- отсутствует интерференция с циркулирующим пучком, так как кристалл располагается далеко от его центра (на “хвосте” распределения частиц);
- нет интерференции с коллайдерным режимом: при выводе $\sim 10^8$ протонов/с фон на два порядка ниже фона в месте встречи пучков при светимости $10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Возможные эксперименты с использованием изогнутых монокристаллов на больших ускорителях:

- Super Fixed Target, SFT (на SSC). Вывод протонов с энергией 20 ТэВ для генерации В-адронов на внешней мишени. Изучение редких распадов и CP-нарушения в В-системе.

- Пучок нейтрино сквозь землю. Уточнение структуры ядра земли и исследование его точнее, чем это известно сегодня.
- LNB (на LHC). Вывод частиц из гало пучка на фиксированную мишень. При выводе 10^8 протонов/с это обеспечит $\sim 10^{10} b\bar{b}$ пар за год работы коллайдера, что на два порядка больше, чем может быть получено на e^-e^+ В-фабрике со светимостью 10^{34} см $^{-2}$ с $^{-1}$.

Существуют также предложения по созданию “экзотических” (например, твердотельных) ускорителей и экспериментов с короткоживущими частицами с использованием эффекта каналирования.

В качестве пробных экспериментов, подтверждающих возможность вывода пучков из будущих ускорителей на сверхвысокие энергии, был осуществлен вывод протонов изогнутыми монокристаллами из ускорителей SPS (CERN, с перспективой на LHC) и Тэватрона (FNAL, для SSC). Второй эксперимент реализован при участии автора, чей опыт вывода пучков изогнутыми монокристаллами из ускорителя ИФВЭ на 70 ГэВ был использован в обеих лабораториях. В результате был впервые зафиксирован зависимый от светимости вывод циркулирующих протонов из Тэватрона с энергией 900 ГэВ.

В настоящее время 900 ГэВ является самой высокой энергией, при которой зафиксировано каналирование частиц в изогнутых кристаллах и осуществлен вывод пучков из ускорителя. Эксперимент E853 расширил значимость ранее осуществленных экспериментов в Дубне, Протвино и CERN, благодаря пучку с энергией 900 ГэВ, выведенному теневым (“parasitic”) образом с помощью изогнутого кристалла из сверхпроводящего ускорителя. Результаты этого эксперимента, даже несмотря на судьбу SSC, представляют интерес в качестве шага, сделанного впервые в направлении возможного использования кристаллов как на LHC CERN, так и на Тэватроне FNAL.

Схема эксперимента E853 представлена на **рис. 37**. Изогнутый кристалл установлен в прямолинейном промежутке C0 вместо одного из кикер-магнитов системы аварийного вывода пучка. Протоны из гало пучка, пересекающие изогнутый кристалл, отклоняются на 640 мкрад вверх в свободную от поля область магнита Ламбертсона (см. вставку рис. 37) и идут точно по трассе аварийного вывода к детекторам выводимого пучка.

Телевизионное изображение выведенного пучка с покрытого люминофором телеэкрана показано на **рис. 38**. В центре яркого пятна камера сильно насыщается, поэтому кажущийся размер пучка много больше, чем реальный размер σ . Наиболее интересное свойство этого изображения — узкий “хвост кометы”, снижающийся вниз от центрального пятна. Соответ-

ствуем протонам, которые не были отклонены на полный угол 640 мкрад всей длиной кристалла.

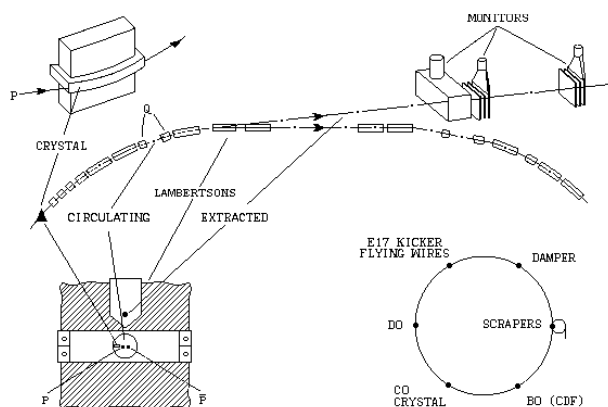
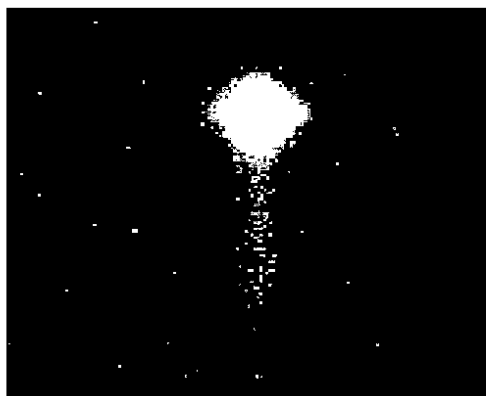


Рис. 37. Вывод пучка кристаллом из Тэватрона.

Рис. 38. Выведенный пучок Тэватрона. Ширина “хвоста” 3 мм.



В двух накопительных сеансах, в которых исследовалась зависимость от светимости, получено значение эффективности каналирования $(28 \pm 8)\%$ и $(35 \pm 11)\%$. В случае заполнения кольца 84 банчами одних протонов эффективность была $(32 \pm 9)\%$.

Опыт обеспечения в течение длительного (более 10 лет) времени нового способа вывода протонов максимальной энергии из У-70 с помощью изогнутых монокристаллов для физических экспериментов, впервые полученный на ускорителе ИФВЭ, позволяет сделать заключение о его

надежности, высокой стабильности параметров пучков, совместимости с другими методами и режимами вывода частиц. Простота использования монокристаллов предполагает целесообразность использования их для вывода пучков как на ускорителе ИФВЭ, так и на ускорителях на более высокие энергии.

Четвертая глава, представляющая собой логическое завершение диссертации, посвящена исследованиям потерь частиц и облучаемости оборудования У-70 при ускорении и выводе пучков, а также разработке, исследованию и реализации мер, позволяющих снизить его облучение. Важность исследований потерь частиц в ускорителе очевидна, и задача управления потерями пучка и ограничения их на таком уровне, при котором работоспособность ускорителя сохранится на длительное время без выхода из строя из-за переоблучения его оборудования, представляется важнейшей для физиков-ускорительщиков.

Ввиду того, что энергия ускоренных протонов У-70 достаточно высока, а рабочая интенсивность пучков превосходит 10^{13} частиц за цикл (проектная интенсивность $5 \cdot 10^{13}$ протонов/импульс), то влияние потерь пучка на работоспособность оборудования ускорителя может иметь серьезные последствия. Например, при взаимодействии таких пучков с веществом могут возникать (и возникают) макроскопические эффекты: повышение температуры и даже плавление (мишеней, участков вакуумных камер), образование ударных волн, вызывающих деформацию или механическое разрушение некоторых узлов, выход из строя электронного оборудования.

Накапливающиеся под действием излучения дефекты в используемых на ускорителях материалах после определенного предела приводят к резкому ухудшению их свойств. Поэтому проблема радиационной стойкости материалов на ускорителях частиц приобретает все большее значение, и следует ожидать, что работоспособность существующих ускорителей, а также развитие ускорительной техники, в первую очередь, будет зависеть от снижения радиационных нагрузок на оборудование за счет **минимизации потерь частиц** при их ускорении и выводе. Другой путь — **повышение радиационной стойкости** материалов требует значительных затрат на исследования и не дает кардинального решения данной проблемы.

Исследования на У-70 потерь частиц по циклу ускорения показали, что основные потери, определяемые динамикой пучка, происходят на следующих этапах:

- при инжекции и в начале ускорения,
- при переходе через критическую энергию,
- при быстром выводе протонов,
- при резонансном медленном выводе,

- при работе внутренних мишеней,
- при перехвате остатков неиспользованной интенсивности.

Временной диапазон потерь частиц на этих этапах очень широк: от микросекунд (например, при БВ) до ~ 2 с при медленном выводе или работе внутренних мишеней. Потери распределяются по всему периметру ускорителя, облучая в большей или в меньшей степени все оборудование. Распределение потерь зависит от многих факторов, таких как динамика пучка в конкретном процессе, наличие “узких” мест в камере ускорителя, интенсивность пучка, эффективность вывода и т.п. Распределения потерь по периметру ускорителя исследовались с помощью системы измерения потерь (СИП), представляющей собой 120 сцинтилляционных детекторов, охватывающих все блоки У-70 и объединенных соответствующей электроникой.

Несколько характерных примеров распределения потерь пучка по периметру ускорителя, например, при инжекции, резонансном медленном выводе и работе внутренних мишеней представлены на **рис. 39, 40, 41** соответственно. Пояснения механизмов потерь и их вклада в облучаемость оборудования представлены в диссертации.

Сравнение распределений потерь по периметру У-70 при БВ пучка высокой интенсивности после ввода бустера (1985 г.) и работы внутренних мишеней может быть сделано по **рис. 42**. Интервал времени измерения потерь составлял: при БВ — 20 мс, при работе внутренних мишеней — 800 мс (всю растяжку).

Представление о степени облучаемости, например, оборудования вывода пучка при работе с высокой интенсивностью может дать **рис. 43**, где приведены для септум-магнитов системы вывода СМ-20, СМ-22: 1, 2 — мощности дозы наведенной р/активности, и 1', 2' — радиационные нагрузки (поглощенные дозы) на их изоляцию.

Здесь следует указать на одно обстоятельство, имеющее прямую связь с приведенными данными. В связи с модернизацией, ко 2-му сеансу 1988 г. были установлены новые СМ-20 и СМ-22, которые во 2-м сеансе 1991 г. вышли из строя из-за радиационных повреждений и были вновь заменены. Доза, полученная септум-магнитами за 14 сеансов работы указанного периода, составила:

- для СМ-20 $\sim 2.0 \cdot 10^6$ Грей ($\sim 2.0 \cdot 10^8$ рад);
- для СМ-22 $\sim 1.2 \cdot 10^6$ Грей ($\sim 1.2 \cdot 10^8$ рад).

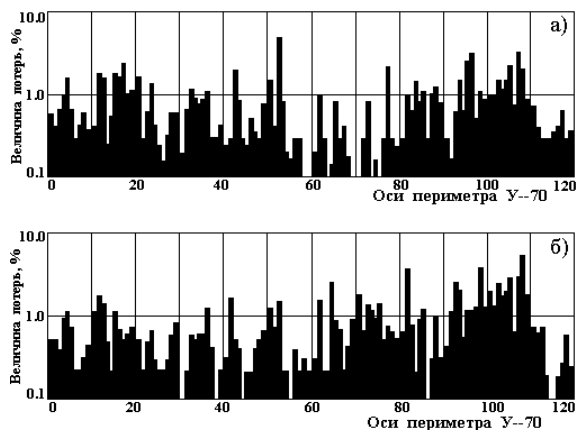


Рис. 39. Распределение потерь при инжекции в ускоритель: а) пятиоборотная инжекция, 57 нс; б) однооборотная, 12 нс.

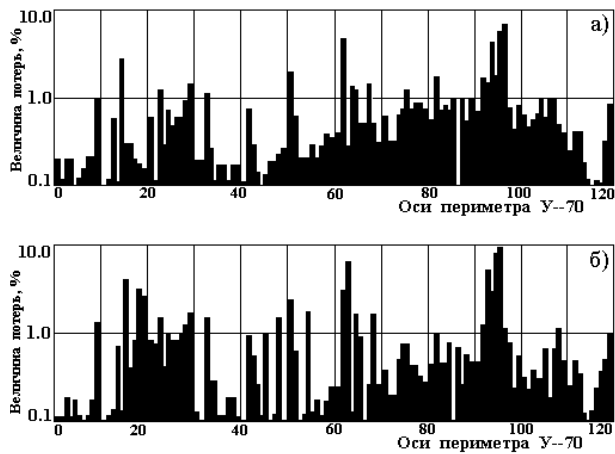


Рис. 40. Распределение потерь частиц при медленном выводе: а) выводится $\sim 2 \cdot 10^{10}$ протонов; б) $\sim 3 \cdot 10^{11}$.

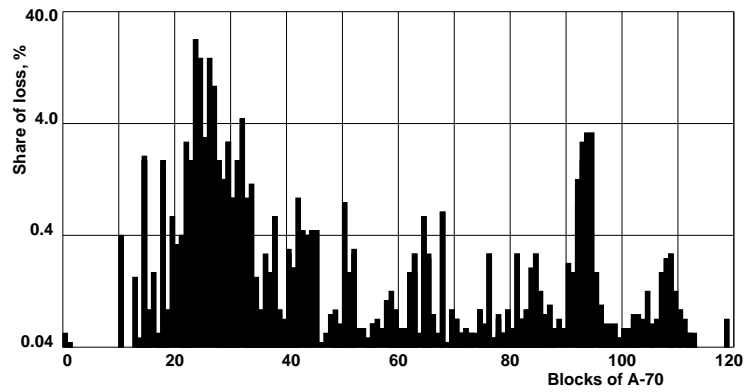


Рис. 41. Распределение потерь по периметру ускорителя при работе внутренних мишеней.

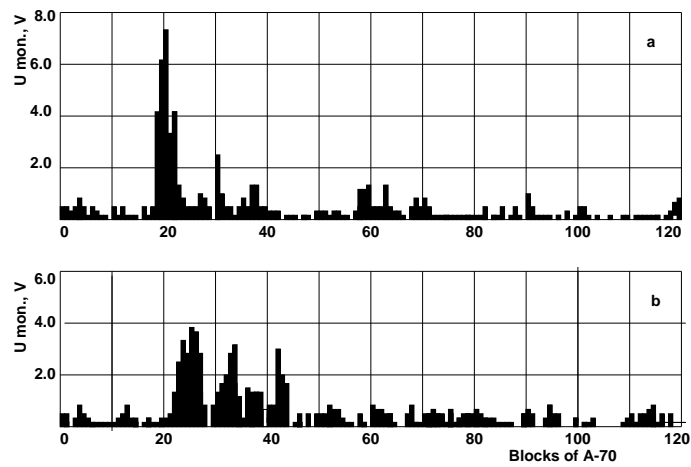


Рис. 42. Распределение потерь пучка в ускорителе: а) при БВ $\sim 10^{13}$; б) при сбросе на внутренние мишени $\sim 1.2 \cdot 10^{12}$ протонов/цикл.

“Время жизни” оборудования в условиях воздействия излучения определяется радиационной стойкостью материалов, использованных при создании У-70. Для основных изоляционных материалов величина поглощенной дозы около 10^6 Грей (10^8 рад) является предельной. При достижении этой величины резко меняются свойства используемых материалов, что может приводить к выходу из строя узлов или деталей оборудования и срыву экспериментов.

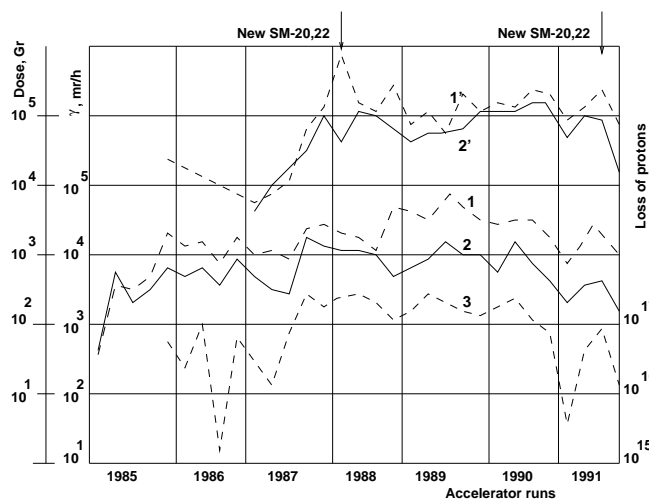


Рис. 43. Результаты дозиметрических измерений на септум-магнитах: 1 — мощность дозы наведенной радиоактивности, 1' — радиационные нагрузки на СМ-20; 2, 2' — то же для СМ-22; 3 — интенсивность потерь протонного пучка.

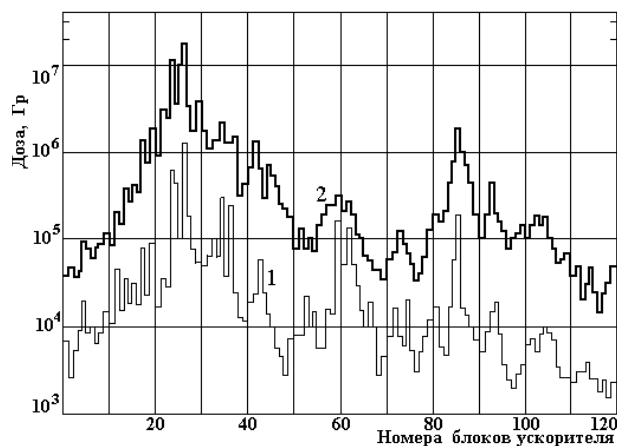


Рис. 44. Дозы, накопленные блоками электромагнита У-70: 1 — за период 1967–1990 гг.; 2 — за период 1967–2002 гг.

Наиболее важная информация о результатах облучаемости магнитных блоков У-70 за 23 года его работы (65 сеансов) от запуска в 1967 г. до 1990 г. включительно представлена кривой 1 **рис. 44**. Гистограмма показывает распределение интегральных поглощенных доз, измеренных на блоках электромагнита (по ходу пучка) мегарадовыми детекторами или вычисленных по данным о потерях в сеансах У-70.

Как видно из распределения, максимальная доза, поглощенная за 65 сеансов работы У-70, достигает 10^6 Грей (10^8 рад) и относится к зоне расположения внутренних мишеней в блоках 24, 27 ускорителя, генерирующих вторичные частицы для физических установок каналов 2; 14 и 4. Далее видны значительные уровни поглощенных доз в районах мишени блока 35 (канал 18), мишени-перехватчика (60-е блоки) и в зоне поглотителя пучка (район блока 86). Остальную часть периметра ускорителя можно отнести к “спокойной” зоне.

Следует отметить, что практически весь этот продолжительный период У-70 работал с невысокой интенсивностью (с инъекцией от ЛУ на 100 МэВ), которая не превышала $(3-5) \cdot 10^{12}$ протонов/цикл. Основное потребление интенсивности было за счет внутренних мишеней, которые и определяли облучаемость оборудования. Кривая 2 **рис. 44** дает возможность почувствовать вклад в облучение оборудования У-70 новых высокоинтенсивных режимов вывода за 25 сеансов последних 12 лет (1991–2002 гг.). Кривая представляет распределение интегральных доз, поглощенных блоками электромагнита У-70 с момента его запуска до конца 2002 г. (за 35 лет работы, 90 сеансов), т.е. это сумма доз кривой 1 и облучения за последние 25 сеансов работы с высокой интенсивностью.

Видно, что расширилась зона высокой облучаемости в районе блоков 18–40, так как к мишеням блоков 24, 27 добавились септум-магниты систем быстрого и медленного выводов, установленные в ПП-18; 20; 22; 24; 26. Токовые перегородки септум-магнитов являются толстыми мишенями для протонов, попадающих на них при выводе.

Резко отличается от зоны максимального облучения зона 60-х блоков, так как после установки поглотителя частиц в ПП-86 мишень-перехватчик демонтирована. Высокие уровни зоны 86–90 блоков объясняются высадкой на поглотитель в конце цикла остатков неиспользованной интенсивности, и интенсивности, которая не выводится из ускорителя при нестандартных ситуациях (например, при дозиметрических запретах). Видно также, что уровни так называемой “спокойной” области тоже заметно выросли.

Помимо исследований динамики потерь пучка в ускорителе и контроля за их величиной очень важной задачей является поиск возможностей минимизации потерь в цикле ускорителя без снижения эффективности его

использования. Естественно, не всегда удается уменьшить потери частиц, характер которых определяется динамикой процесса, но в ряде случаев можно ограничить их радиационное воздействие на оборудование, используя обрезание, коллимацию и перехват теряемых частиц (или всего пучка) специальными устройствами. Потери частиц можно минимизировать, вводя, например, программирование интенсивности [22].

Пример минимизации потерь за счет регулирования интенсивности при инжекции пучка представлен на **рис. 45**: а) распределение потерь при обычном режиме 5-оборотной инжекции; б) при программируемом регулировании длительности импульса тока ЛУ. Видно существенное улучшение ситуации. При этом уровни доз, поглощенных материалом линз медленного вывода в режиме, соответствующем рис. 45б, уменьшились более чем в 10 раз ($\epsilon \sim 10^7$ рад до $(0.3-1) \cdot 10^6$ рад). При работе с бустером, ввиду другого способа ввода пучка в У-70, облучение линз ПП-12 при инжекции перестало быть доминирующим.

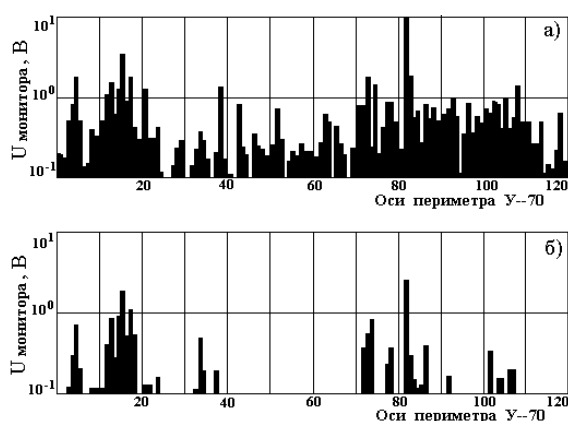


Рис. 45. Распределение потерь частиц при инжекции в ускоритель: а) обычный режим 5-оборотной инжекции; б) при работе устройства [22].

С ростом интенсивности пучка ускорителя проблемы вывода частиц существенно усложняются, так как эффективное увеличение размеров пучка ведет к снижению эффективности быстрого и медленного выводов. С целью изучения возможности формирования пучка перед БВ и снижения фона по трассе нейтринного канала было осуществлено с помощью внутренней мишени обрезание $\sim 5\%$ интенсивности ускоренного пучка. Оказалось, что таким образом можно сформировать пучок, в котором отсутствует гало и плотная часть пучка имеет меньшие размеры. Распределение

потерь частиц, измеренное вдоль головной части нейтринного канала при БВ такого пучка, сравнивалось с распределением потерь при выводе “необрезанного” пучка. Сравнение показало, что, благодаря обрезанию, удается уменьшить величину потерь в канале более чем в 3 раза.

Наиболее эффективным способом продлить срок службы оборудования ускорителя является **перехват** потерь протонного пучка. Перехват осуществляется таким образом, чтобы локализовать потери частиц в одном месте периметра ускорителя, обеспечив тем самым минимум облучаемости оборудования оставшейся части периметра. Система перехвата ИФВЭ способна обеспечить локализацию потерь пучка с энергией 1.5–70 ГэВ и интенсивностью до $5 \cdot 10^{13}$ протонов/цикл. Она позволяет также осуществить формирование поперечных размеров высокоинтенсивного пучка перед выводом его из ускорителя путем обрезания частиц поглотителем после рассеяния на мишени.

Система перехвата пучка размещена в ПП–86 и состоит из рассеивающих мишеней, поглотителя пучка и внешней защиты. Для подвода пучка к мишени–рассеивателю используется локальное искажение орбиты, формируемое токами дополнительных обмоток блоков У–70. В результате взаимодействия пучка с мишенью происходит увеличение амплитуд бетатронных колебаний частиц и заброс их на поглотитель. Таким образом удаляется часть частиц из “хвостов” начального распределения. При перехвате всей интенсивности пучок должен забрасываться на торец поглотителя при помощи кикер–магнита БВ.

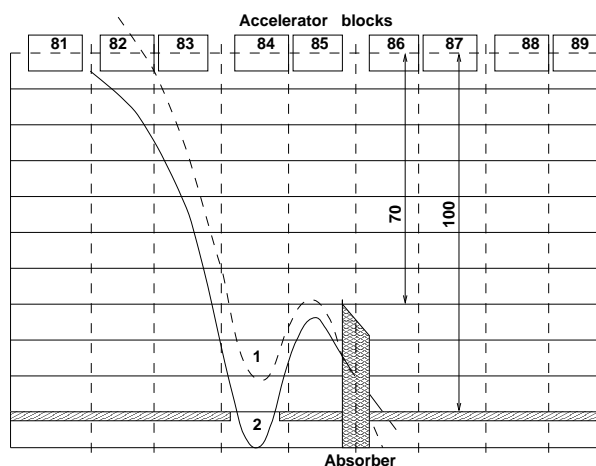


Рис. 46. Форма искажения орбиты в районе поглотителя ПП–86.

Форма локального искажения орбиты для смещения пучка при полном перехвате представлена на **рис. 46**. Теоретический анализ, сделанный С.Л. Кучининым, показал, что при забросе пучка на поглотитель с помощью КМ-16, когда значительно снижается выход в апертуру вакуумной камеры частиц с кромки поглотителя, эффективность перехвата близка к 100%. В случае заброса на поглотитель пучка с помощью мишенной эффективность обрезания составляет 95% и система позволяет существенно снизить уровни облучения оборудования за пределами зоны перехвата (т.е. на 90% периметра ускорителя).

В диссертации также даны рекомендации по уменьшению потерь пучка в цикле ускорителя и приведены оценки возможного снижения потерь для оптимально работающих систем вывода У-70. Кроме того, создав на У-70 систему аварийного вывода (без такой системы сейчас немыслима работа крупных ускорителей), обеспечивающую выброс пучка из кольцевой камеры отдельный канал на специальный поглотитель в любой нештатной или программируемой ситуациях, можно добиться ограничения остатков интенсивности на уровне 1-2%.

В случае осуществления новых высокоэффективных режимов вывода и создания системы аварийного вывода пучка можно будет обеспечить уровни потерь, не превышающие следующих величин:

- при быстром выводе — 1-2%,
- при резонансном медленном выводе — 4%,
- при работе внутренних мишенных — 10%,
- при перехвате остатков интенсивности — 1-2%.

Это означает, что радиационные нагрузки на оборудование У-70, чрезмерные в существующей ситуации, могут быть снижены в 4-5 раз. В свою очередь, это обеспечит в несколько раз более длительную работоспособность оборудования У-70 и повышение эффективности использования для экспериментов всего ускорительного комплекса.

В Заключении кратко сформулированы **основные результаты** диссертации:

1. Исследованы условия совместимости работы трех внутренних мишенных, формирующих пучки вторичных частиц для каналов 2(14); 4; 5Н(4Н); 6; 18; РП при независимом наведении на них протонного пучка. С учетом "теневого" режима обеспечена **одновременная работа** 4-5 физических установок любых из 6 существующих каналов, получающих частицы с мишенной во всем диапазоне их рабочих координат.

2. Обоснован выбор материала новых тонких мишеней, охлаждение которых в условиях высокого вакуума происходит лишь за счет излучения энергии. Мишень выдерживает взаимодействие с пучком протонов интенсивностью до 10^{12} (аварийно — до $5 \cdot 10^{12}$) за цикл в течение многих месяцев.
3. Впервые для генерации вторичных частиц на У-70 внедрена тонкая мишень из углеродной ткани, что обеспечило подавление как низкочастотных (до сотен герц) пульсаций систем ускорителя, так и ВЧ-пульсаций (~ 200 кГц) во всех одновременно выводимых пучках. Временная структура пучков улучшена почти на порядок.
4. Обнаружено, что пучок ускоренных протонов, имеющий ярко выраженную однооборотную структуру после БВ 25 банчей, через ~ 300 мс от начала взаимодействия с тонкой мишенью меняет свое состояние и находится одновременно в двух фазах: банчирующей и дебанчирующей. Вторая фаза обеспечивает кардинальное улучшение временной структуры вторичных частиц и первичных протонов, выводимых одновременно в разные направления.
5. Осуществление одновременной работы 5 физических установок с максимальной длительностью вывода увеличило эффективность экспериментов **на пучках вторичных частиц нового качества** более чем в 2 раза. Новое качество пучков дополнительно повышает их эффективность примерно в 1,5 раза.
6. Исследованы нестандартные способы вывода: параллельная работа ВМ с РМВ, РМВ протонов одновременно в два независимых направления, двукратный БВ высокоинтенсивного пучка. Реализуемость этих способов открывает возможность осуществления в ИФВЭ новых экспериментов по физике высоких энергий.
7. **Впервые в практике вывода частиц из жесткофокусирующих ускорителей** в ИФВЭ осуществлен нерезонансный медленный вывод (НМВ) протонов, ускоренных до энергии 70 ГэВ, что сделало доступным для экспериментов диапазон промежуточных интенсивностей $10^7 \div 10^{11}$ частиц за цикл. Осуществлен последовательно-параллельный вывод ускоренных протонов и вторичных частиц.
8. Исследован и осуществлен НМВ протонов для новых экспериментов на установке СФИНКС (канал 21), ФОДС-2 и СВД (канал 22), КМН (канал 23) параллельно с работой 4–5 внутренних мишеней. Без НМВ эти эксперименты не состоялись бы. Показано, что НМВ перспективен не только для У-70, но и для ускорителей на более высокие энергии.

9. **Впервые в практике физического эксперимента** в ИФВЭ осуществлен и развит новый метод вывода протонов — с помощью изогнутого монокристалла Si на установку ПРОЗА для развития программы поляризационных исследований. Исследован вывод пучка протонов для нового эксперимента на установку ВЕС. Предложена схема наведения пучка на монокристалл, ослабляющая требования к их взаимной юстировке. Другой возможности вывести пучок протонов на эти установки не существовало.
10. Реализован **одновременный** вывод вторичных частиц с внутренних мишеней и ускоренных протонов с помощью изогнутого монокристалла и НМВ на 5–6 физических установок. При работе с БВ и/или РМВ коэффициент одновременности экспериментов в цикле У–70 может достигать 7–8.
11. Получено **первое экспериментальное подтверждение** увеличения с помощью изогнутого монокристалла интенсивности пучка, выводимого в режиме НМВ: монокристалл перед дефлектором системы вывода снижает потери на септуме, увеличивая число выводимых частиц.
12. Показана перспективность использования изогнутых монокристаллов для осуществления новых экспериментов и вывода частиц на фиксированные мишени из трансэвневых ускорителей, таких как ЛНС и SSC. Эксперимент E853 подтвердил каналирование частиц самой высокой энергии из исследовавшихся когда-либо — 900 ГэВ. Вывод пучка из Тэватрона может осуществляться без влияния на “коллайдерные” эксперименты и одновременно с их проведением.
13. Результаты многолетних (более 30 лет) исследований потерь частиц в У–70 при их ускорении и выводе и связанных с ними радиационных нагрузок на оборудование показали, что после получения доз $\sim 10^8$ рад резко меняются свойства используемых материалов, что приводит к выходу из строя уникального оборудования.
14. Реализованы меры по минимизации потерь протонов с энергией 100 МэВ, значительно снизившие облучаемость оборудования У–70 в зоне инжекции пучка. Обсуждаются другие меры, реализованные и предлагаемые к реализации на У–70. Ожидаемый результат снижения облучаемости оборудования У–70 — 4–5 раз.

Список литературы

- [1] А.А.Асеев, Н.А.Галяев, В.Н.Запольский, Э.А.Людмирский, А.В.Максимов, Ю.А.Чесноков. Нерезонансный медленный вывод протонов из ускорителя ИФВЭ на установку ФОДС-2. *ЖТФ*. 1990, т.60, №9, с.70.
- [2] A.A. Asseev, A.P. Elin, A.V. Kalaidov, S.N. Lapitskij, A.V. Minchenko. Nonresonant slow extraction of protons from the IHEP accelerator to the SWD setup. *Proceedings of the 3-d European PAC, Berlin, 1992, v.2, p.1486*.
- [3] A.A.Asseev, M.Yu.Gorin. Non-resonant slow extraction of protons to the Tagged Neutrino Facility. *Proceedings of the 5-th European PAC, Barcelona, 1996, v.3, p.2412*.
А.А.Асеев, М.Ю.Горин. Нерезонансный медленный вывод протонов на установку Комплекс Меченых Нейтрино. *Труды XV совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1996, т.2, с.291*.
- [4] A.A.Asseev, A.N.Vasiliev, E.A.Ludmirsky, V.A.Maisheev, S.B.Nurushev, Yu.S.Fedotov. Peculiarities of using the bent crystal for the extraction of protons from the IHEP accelerator to the PROZA setup. *Nucl. Instr. and Methods A330 (1993) 39*;
A.A.Asseev, A.N.Vasiliev...Yu.S.Fedotov. About extraction of 70 GeV protons by a bent crystal from the IHEP acelerator to the PROZA setup. *Proceedings of the IEEE PAC, Washington, D.C., 1993, v.1, p.315*.
- [5] A.A.Asseev, V.A.Maisheev, E.A.Муае. Extraction of 50 GeV protons from the IHEP accelerator by the bent crystal. *Nucl. Instr. and Methods A334(1993)283*;
Proceedings of the IEEE PAC, Washington, D.C., 1993, v.1, p.322.
- [6] A.A.Asseev, M.Yu.Gorin. Crystal-aided non-resonant extraction of 70 GeV protons from the IHEP accelerator. *Nucl. Instr. and Methods B119 (1996) 210*.
- [7] C.T.Murphy, R.Carrigan, D.Chen, G.Jackson, N.Mokhov, H.-J.Shih, B.Cox, V.Golovatyuk, A.McManus, A.Bogacz, D.Cline, S.Ramachandran, J.Roades, J.Rosenzweig, B.Newberger, J.A.Ellison, S.Baker, C.R.Sun, W.Gabella, E.Tsyganov, F.Taratin, A.Asseev, V.Biryukov, A.Khazadeev, T.Prokofieva, V.Samsonov, G.Solodov. First results from bent crystal extraction at the Fermilab Tevatron. *Nucl. Instr. and Methods B119 (1996) 231*.
- [8] C.T.Murphy, R.A.Carrigan,Jr.,... A.Asseev et al. Results from bent crystal extraction at the Fermilab Tevatron. *Proceedings of the Internat. Symposium on Near Beam Physics. FNAL, Batavia, USA, 1997, p.157*.
- [9] А.А. Асеев, В.Н. Гришин, Б.А. Зеленов, В.А. Медведев, А.А. Неушкин, В.А.Сычев. Параллельная работа трех внутренних мишеней протонного синхротрона ИФВЭ. *Препринт ИФВЭ 85-78, Серпухов, 1985*.
- [10] Ю.М.Адо, А.А.Асеев, А.А.Кардаш, А.П.Куров, С.В.Соколов, М.И.Чернецов. Использование тонких внутренних мишеней протонного синхротрона ИФВЭ. *Препринт ИФВЭ 88-9, Серпухов, 1988*.

- [11] Ю.М.Адо, А.А.Асеев, А.А.Кардаш, А.П.Куров, С.В.Соколов. Улучшение временной структуры пучков вторичных частиц с помощью тонких мишеней. *Труды XI Всесоюзного совещания по ускор. заряж. частиц, Дубна, 1989, т.2, с.315.*
- [12] А.А.Асеев, М.Г.Дулимова. Возможность двукратного вывода пучка протонов из ускорителя ИФВЭ для нейтринных исследований. *Препринт ИФВЭ 91-154, Протвино, 1991.*
- [13] А.И.Акимцев, А.А.Асеев, К.Ф.Герцев, В.В. Комаров, О.В. Курнаев, А.В. Кутвинов, Л.Л. Мойжес, К.П. Мызников, В.М. Татаренко. Двукратный вывод протонов для облучения пузырьковых камер на ускорителе ИФВЭ. *ПТЭ N5 (1976) 38.*
- [14] Ю.М.Адо, А.А.Асеев, А.Г.Афонин, В.И.Дианов. Режим одновременной работы медленного вывода и внутренних мишеней на протонном синхротроне ИФВЭ. *Труды XI Всесоюзного совещания по ускор. заряж. частиц, Дубна, 1989, т.2, с. 272.*
- [15] А.А.Асеев, Э.А.Людмирский, Ю.С.Федотов. Возможность одновременной работы медленного вывода в два независимых направления. *Препринт ИФВЭ 87-16, Серпухов, 1987.*
- [16] A.A.Asseev. Near Beam Physics at IHEP: I. Near Beam methods of particle extraction. *Proceed. of the Intern. Symposium on Near Beam Physics. FNAL, USA, 1997, p. 165.*
- [17] A.A.Asseev, M.Yu.Gorin. Use of a bent crystal for beam extraction in a slow extraction mode. *Proceed. of the 1995 PAC and Intern. conference on high energy accelerators. Dallas, 1995, v. 3, p. 1955.*
- [18] А.И.Акимцев, А.А.Асеев, А.А.Журавлев. Распределение потерь пучка в протонном синхротроне ИФВЭ на разных этапах цикла ускорения. *Препринт ИФВЭ 83-20, Серпухов, 1983.*
- [19] А.А.Асеев, В.Е.Бородин. Облучаемость оборудования вывода пучка протонного синхротрона ИФВЭ. Часть I. До запуска бустера. *Препринт ИФВЭ 92-147, Протвино, 1992.*
- [20] Асеев А.А., В.Е.Бородин. Облучаемость оборудования вывода пучка протонного синхротрона ИФВЭ. Часть II. При работе с высокой интенсивностью. *Препринт ИФВЭ 92-148, Протвино, 1992.*
- [21] А.А.Асеев, В.Е.Бородин. Радиационные нагрузки на кольцевой электромагнит протонного синхротрона на 70 ГэВ (банк данных). *Препринт ИФВЭ 91-64, Протвино, 1991.*
- [22] А.А.Асеев, В.М.Леденев, В.Ф.Сухомлинов. Устройство для регулирования интенсивности пучка заряженных частиц синхротрона. *Государственный реестр изобретений СССР, Авторское свидетельство N° 1218912, 1985.*

- [23] A.A.Asseev. Extraction of elastically scattered protons at IHEP. *Proceed. of the VIII Intern. Conference on Elastic and Diffractive Scattering (Blois VIII). Protvino, 1999. World Scientific, Singapore, p. 135.*
- [24] A.A.Asseev. Near Beam Physics at IHEP: II. Complementary Methods of Beam Control. *Proceedings of the International Symposium on Near Beam Physics. FNAL, Batavia, USA, 1997, p. 226.*
- [25] А.А.Асеев, А.А.Журавлев. О потерях пучка в ускорителе ИФВЭ и некоторые результаты по облучаемости оборудования. *Препринт ИФВЭ 77-65, Серпухов, 1977.*
- [26] A.A.Asseev, S.V.Sokolov. Investigation of the IHEP proton synchrotron beam debunching during its interaction with a thin internal target. *Proceedings of the 2-nd EPAC, Nice, 1990, v. 2, p. 1725.*
- [27] А.А.Асеев, М.Г.Дулимова, А.А.Кардаш, В.А.Медведев, В.К.Перебейнос. Формирование локального искажения замкнутой орбиты для одновременного вывода вторичных частиц и протонов из ускорителя ИФВЭ. *Препринт ИФВЭ 91-17, Протвино, 1991.*
- [28] А.А.Асеев, М.Ю.Горин. BEAMDYN — программа для расчетов динамики пучка в жесткофокусирующем ускорителе ИФВЭ. — *Труды XV Российского совещания по ускорителям заряж. част., Протвино, 1996, т. 2, с. 196.*
- [29] А.А.Асеев, Г.Е.Воронин, Ю.Г.Каршев, А.В.Максимов, А.В.Минченко. Вывод протонов, упруго рассеянных W и Cu мишенями ускорителя ИФВЭ. Первые результаты. *Труды XVII Российского совещания по ускор. заряж. частиц. Протвино, 2000, т. 2, с. 280;*
A.Asseev, Yu.Karshev, A.Maksimov, A.Minchenko, G.Voronin. Extraction of protons elastically scattered by W and Cu targets of the IHEP accelerator. The first results. — *Proceedings of the 2001 PAC, Chicago, USA, 2001, v. 2, p. 1562.*
- [30] А.А.Асеев, М.Ю.Горин, Б.А.Зеленов, А.А.Кардаш, В.А.Медведев. О возможности работы установки ГАМС-4π при положительных координатах внутренних мишеней блока 27 ускорителя ИФВЭ. — *Proceedings of the 4-th European PAC, London, 1994, v. 3, p. 2379.*
- [31] A.A.Asseev, E.A.Myaе, S.V.Sokolov, Yu.S.Fedotov. On increasing the bent crystal extraction efficiency by using a thin internal target. *Nucl. Instr. and Methods A324 (1993) 31;*— *Proceedings of the 3-d European PAC, Berlin, 1992, v. 2, p. 1493.*
- [32] A.A.Asseev. On using the thin target at extraction of protons from the accelerators by bent crystal. — *Proceedings of the 1993 PAC, Washington, D.C., v. 1, p. 324.*
- [33] A.A.Asseev, S.V.Sokolov. Influence of the thin internal target on the bent crystal extraction efficiency. *Nucl. Instr. and Methods A334 (1993) 325;* — *Proceedings of the 1993 PAC, Washington, D.C., 1993, v. 1, p. 320.*

- [34] A.A.Asseev, M.Yu.Gorin, P.T.Pashkov. The efficiency analysis of the proton beam extraction from the IHEP accelerator by a bent crystal. – In: *Proceedings of the 5-th European PAC, Barcelona, 1996, v. 3, p. 2412.*
- [35] A.A.Asseev, M.Yu.Gorin. One more possibility of using bent crystals for beam extraction from accelerators. *Nucl. Instr. and Methods A372 (1996) 1.*
- [36] A.Asseev, S.I.Baker, S.A.Bogacz, V.Biryukov, R.A.Carrigan, Jr.D.Chen, D.Cline, B.Cox, J.A.Ellison, W.Gabella, V.Golovatyuk, G.Jackson, A.Khanzadeev, A.McManus, N.Mokhov, C.T.Murphy, B.Newberger, T.Prokofieva, S.Ramachandran, J.Roades, J.Rosenzweig, V.Samsonov, H.-J. Shih, G.Solodov, A.Taratin. First Observation of Luminosity-driven Extraction Using Channeling with a Bent Crystal. – *Fermilab-Pub-97/300-E (E853) FNAL, USA, 1997.*
- [37] R.A.Carrigan, Jr.D.Chen, G.Jackson, N.Mokhov, C.T.Murphy, S.Baker, A.Bogacz, D.Cline, S.Ramachandran, J.Roades, J.Rosenzweig, A.Asseev, V.Biryukov, A.Taratin, J.A.Ellison, A.Khanzadeev, T.Prokofieva, V.Samsonov, G.Solodov, B.Newberger, E.Tsyganov, H.-J.Shih, W.Gabella, B.Cox, V.Golovatyuk, A.McManus. Beam extraction studies at 900 GeV using channeling in a crystal. *Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, v. 5, 043501 (2002).*

Рукопись поступила 12 февраля 2004 г.

А.А. Асеев.

Методы вывода частиц из протонных ускорителей на высокие энергии с использованием поликристаллических и монокристаллических внутренних мишеней.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **LaTeX**.

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 20.02.2004. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 3,9. Уч.-изд.л. 4.4. Тираж 100. Заказ 277. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2004–8, И Ф В Э, 2004
