

10

© 1990 г.

## НЕРЕЗОНАНСНЫЙ МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПРОТОНОВ ИЗ УСКОРИТЕЛЯ ИФВЭ НА УСТАНОВКУ ФОДС-2

*А. А. Асеев, Н. А. Галаяев, В. Н. Запольский, Э. А. Людмирский,  
А. В. Максимов, Ю. А. Чесноков*

Программой исследований на установке ФОДС-2 предусмотрена работа с пучком медленно выведенных протонов с энергией 70 ГэВ в диапазоне интенсивностей  $10^6$ — $10^{10}$  частиц за цикл. Существующая система резонансного медленного вывода в указанном диапазоне интенсивностей не может обеспечить требуемого качества временной структуры.

В работе приводятся результаты исследований и вывода с помощью септум-магнитов протонов, упруго рассеянных на внутренних мишенях, и формирования на установке ФОДС-2 пучка, удовлетворяющего требованиям эксперимента. Благодаря применению тонкой внутренней мишени достигнуто новое качество выводимого пучка: величина модуляции временной структуры снижена в несколько раз по сравнению с полученной ранее и обеспечен ее уровень  $\sim 10\%$ . Осуществлена одновременная работа установки ФОДС-2 и каналов вторичных частиц 2 и 4, благодаря чему существенно повышена эффективность использования ускоренного пучка, а длительность растяжки пучков вторичных частиц, получаемых с внутренних мишеней, увеличена примерно вдвое.

### Введение

В 1987 г. на ускорителе ИФВЭ осуществлен физический запуск нового универсального высокоинтенсивного канала 22 и одной из расположенных на нем экспериментальных установок — модифицированной установки ФОДС-2, предназначенной для изучения процессов образования частиц в жестких соударениях адронов. Программой исследований на этой установке [1] предусмотрена, в частности, работа с пучком медленно выведенных протонов с энергией 70 ГэВ в диапазоне интенсивностей  $10^6$ — $10^{10}$  частиц/цикл. При этом предъявляются высокие требования к основным параметрам сформированного пучка, таким как амплитуда временной модуляции интенсивности, длительность вывода, пространственные и угловые размеры пучка на мишени экспериментальной установки, допустимый уровень адронного фона и др.

Существующая система резонансного медленного вывода [2] в указанном диапазоне интенсивностей не может обеспечить требуемого качества временной структуры выведенного пучка. В настоящей работе сообщаются результаты вывода с помощью септум-магнитов (назовем его нерезонансным медленным выводом НМВ) протонного пучка, полученного в результате рассеяния частиц на внутренних мишенях, и формирования в канале 22 пучка, удовлетворяющего требованиям эксперимента [1–4]. Благодаря применению тонкой внутренней мишени [5] достигнуто новое качество выводимого пучка: величина модуляции временной структуры снижена в несколько раз по сравнению с полученной [3] и обеспечен уровень  $\sim 10\%$ . Реализован режим одновременной работы канала 22 и каналов вторичных частиц 2 и 4, благодаря чему существенно повышена эффективность использования ускоренного пучка, а длительность растяжки пучков вторичных частиц, получаемых с внутренних мишеней, увеличена примерно вдвое.

Сообщаются также результаты формирования пучка на мишень экспериментальной установки и его рабочие параметры.

О возможности нерезонансного медленного вывода из ускорителя FNAL было сообщено А. В. Машке, а Ш. Стейнбах оценил эффективность его применения для ускорителя SPS ЦЕРНа [6]. Очевидная простота этого метода и высокая ожидаемая его эффективность [6, 7] ставят его в один ряд с уже существующими и опробованными, но более сложными и дорогими резонансными методами вывода первичных пучков протонов. Не заменяя последних, он обладает целым рядом преимуществ, важнейшим из которых является возможность вывода из ускорителя пучков протонов промежуточной ( $10^7$ — $10^{11}$  частиц/цикл) интенсивности, ранее недоступной для экспериментов. Применение его на ускорителе ИФВЭ позволило обеспечить выполнение экспериментальной программы установки ФОДС [3].

Эффективность реализованного НМВ в настоящее время невысока. Основная причина заключается в большой толщине перегородки первого септума

Номер варианта	Мишени-рассеиватели	Ток СМ-20, А	Ток СМ-22, А	Работа НМВ с внутренними мишенями
1	M35	9930	9050	Последовательная То же Параллельная
2	M18	8580	8670	
3	M24//M27	6380	7150	

магнита. При выводе пучка на установку ФОДС [3] была зафиксирована эффективность  $\sim 5\%$  (при толщине перегородки септума-магнита  $\sim 1$  мм). Установка нового септума-магнита СМ-18 (первого отклоняющего элемента) с более тонкой токовой перегородкой ( $\sim 0.47$  мм вместо  $1.0$  мм) [8] позволила снизить потери частиц, а замена оптических элементов ПП-30 на элементы с большей апертурой — в  $1.5$ — $2$  раза увеличить аксептанс выводной части канала. В результате по оценкам последних режимов была достигнута эффективность  $\sim 15$ — $20\%$ . Оценки эффективности НМВ, выполненные для существующей структуры ускорителя ИФВЭ, показали, что после ввода электростатического дефлектора с толщиной проволоки  $\sim 0.1$  мм и выбора оптимальных параметров мишени (материал, толщина, место установки) возможно достижение величины  $\sim 90$ — $95\%$ , что согласуется с данными [6] для ускорителя SPS ЦЕРНа.

Поскольку динамика частиц пучка при раскраске с помощью мишени описана в [3], то отметим здесь только некоторые особенности конкретного режима. С целью повышения эффективности использования пучка реализован НМВ протонов, рассеиваемых одновременно на мишенях каналов 2 и 4 (основных потребителей пучков вторичных частиц). Эти мишени установлены на участке вывода (в 24- и 27-м магнитных блоках У-70), поэтому работа систем наведения пучка в диапазоне координат мишеней  $\pm 40$  мм от центра вакуумной камеры противодействовала дальнейшей транспортировке протонов, заброшенных в результате раскраски в апертуру септума-магнита СМ-18. Расчеты показали возможность реализации совмещенного режима и он в настоящее время является основным, обеспечивая более высокое по сравнению с резонансным МВ качество временной структуры (см., например, [9]) и значительно большую длительность растяжки пучков ( $\sim 1.6$  с для каналов вторичных частиц и  $\sim 1.0$ — $1.2$  с для установки ФОДС-2 вместо  $\sim 0.7$  с при их последовательной работе).

На рис. 1 приведена схема вывода пучка (кривая I). Отличие трассы от реализованной в [3] в том, что последним элементом, осуществляющим вывод пучка из ускорителя, является магнит СМ-26 [9, 10], установленный вместо септума-магнита быстрого вывода, который не использовался при МВ. Координаты траектории вывода в районе магнитных блоков 20—26 сохраняются за счет изменения сил септума-магнитов СМ-20 и СМ-22, компенсирующих влияние систем наведения пучка на мишени. В таблице приведены величины токов в обмот-

ках септум-магнитов при последовательной и параллельной работе НМБ с внутренними мишенями. Последовательная работа описана в [3], в этом случае раскачка пучка производится отдельной мишенью и нет «чужих» бампов на участке вывода, параллельная работа — реализованный режим.

Подведение пучка к перегородке септум-магнита СМ-18 осуществляется, как и в [3], с помощью бампов, формируемых токами дополнительных обмоток блоков 15, 16, 21, 22 (на рисунке не показаны). Кривая 2 на рис. 1 — искажение замкнутой орбиты, формируемое с помощью токов дополнительных обмоток блоков 20, 26 и 24, 30, обеспечивающих подвод пучка к мишеням каналов 2 и 4

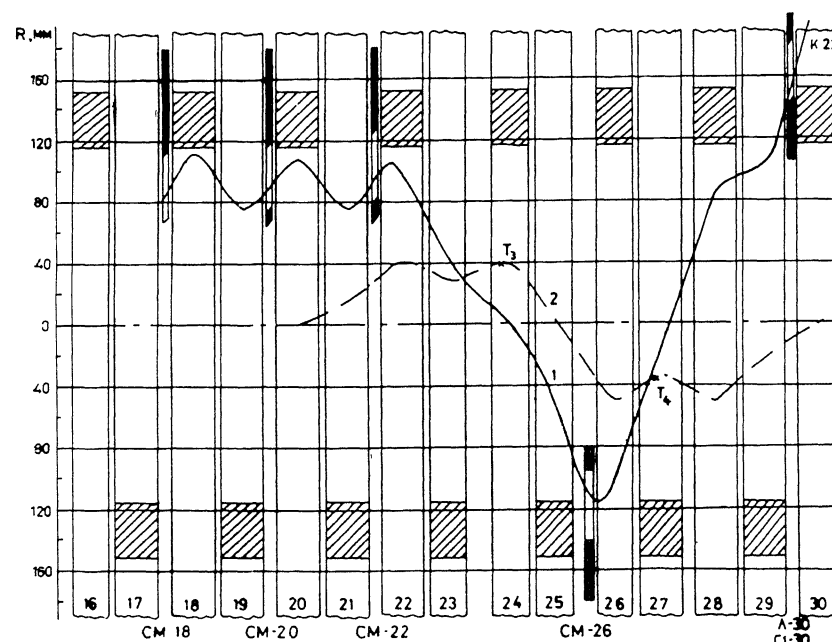


Рис. 1. Схема нерезонансного медленного вывода протонов, рассеянных на мишенях каналов 2 и 4.

1 — траектория вывода пучка в канал 22; 2 — искажение замкнутой орбиты при работе систем наведения пучка на мишени; T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> — мишени каналов 2 и 4 соответственно.

(соответственно T<sub>3</sub> и T<sub>4</sub>) при их одновременной работе. Звездочками отмечены рабочие координаты этих мишеней. Некомпенсация бампов наведения, приводящая к небольшим отклонениям орбиты пучка в районе СМ-18 и СМ-20, не приводит к заметным отклонениям режима элементов расчётного.

### Формирование пучка на мишени экспериментальной установки ФОДС-2

Эмиттанс пучка  $E_{r, x}$ , получаемый при резонансном медленном выводе в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно, равен  $1.3 \times 2.7$  мм·мрад [2]. При выводе протонов нерезонансным методом эмиттанс пучка существенно больше (см., например, [3]) и необходимо было для существующей геометрии канала рассчитать режимы фокусировки, удовлетворяющие требованиям транспортировки пучка. Форма фазового эллипса пучка в ПП-30 для данного режима приведена на рис. 2, а. Она аналогична форме фазового эллипса, полученного в [3] (рис. 2, б, штриховая линия), и отличается углом наклона к оси из-за разных магнитных полей оконечного участка трассы (вывод из СМ-26, а не из СМ-28). Заштрихованные на рис. 2 линии показывают границы горизонтальной апертуры линзы предварительной фокусировки пучка ПП-30 в старом (1) варианте и после установки элементов с большей апертурой (2). Принятый для расчетов фокусировки эмиттанс пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях составляет  $E_{r, x} = 2.7 \times 6.0$  мм·мрад. Измерения эмиттанса, проведенные в районе мишеней T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> (рис. 3), хорошо согласуются

с указанными значениями. Для формирования пучка на мишенях T1 и T2 использовались соответственно два режима фокусировки. На рис. 3 приведена оптическая схема части системы предварительной фокусировки пучка на мишенях T1 и T2 (от выхода пучка из зоны рассеянных полей блоков 30 и 31) и огибающие пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях (сплошная линия — фокусировка на T1, штриховая — на T2). Видно, что, хотя из-за большого эмиттанса пучка огибающие близки к границам апертур некоторых квадрупольных линз, в обоих режимах возможно получение требуемых для дальнейшей транспортировки размеров пучка в районе внешних мишеней.

Для дальнейшего формирования и фокусировки пучка на мишень экспериментальной установки были опробованы несколько вариантов оптических схем канала 22. При этом для всех опробованных режимов параметры пучка на ми-

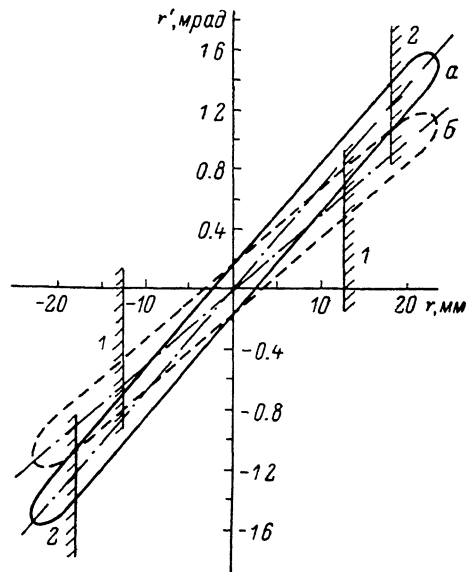


Рис. 2. Горизонтальный фазовый объем пучка на выходе из ускорителя (в ПП-30).  
а — вывод из СМ-26, б — вывод из СМ-28 [°].

шени установки ФОДС-2 удовлетворяли требованиям эксперимента. На рис. 4 приведена одна из опробованных оптических схем, позволяющая посредством изменения режимов квадрупольных линз в широких пределах менять размеры пучка на мишени экспериментальной установки в горизонтальной и в большей

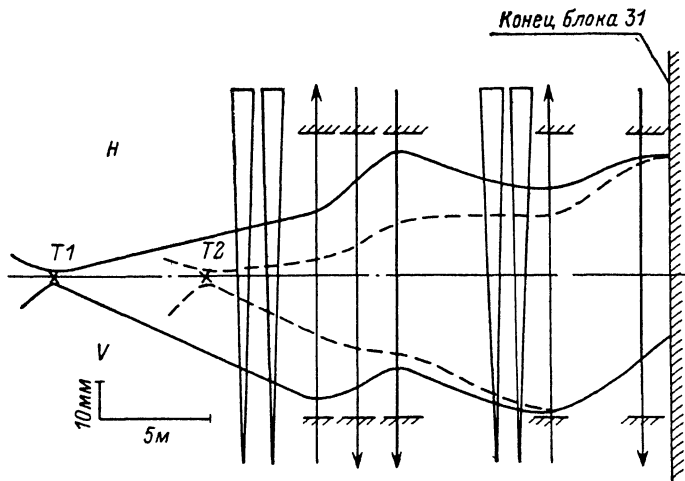


Рис. 3. Оптическая схема тракта предварительной фокусировки пучка на внешние мишени и огибающие пучка для двух режимов.

Сплошная линия — фокусировка пучка на мишень T1, штриховая — фокусировка пучка на мишень T2.

мере вертикальной плоскостях. Существенной особенностью приведенной схемы является независимость вертикального размера пучка на мишени экспериментальной установки от изменения его положения в районе мишени станции T1.

По условиям эксперимента требовалось варьировать в широких пределах угол падения протонного пучка на мишень установки. Такой режим работы в полной мере обеспечивала оптическая схема, приведенная на рис. 5. На рис. 6 приведены типичные профили пучка в двух сечениях канала, отстоящих от

мишени экспериментальной установки соответственно на 4 и 1.38 м. Профили пучка получены с помощью многоканальных детекторов системы мониторинга установки ФОДС-2 [11].

### Экспериментальные результаты

Одним из наиболее важных параметров, определяющих эффективность физического эксперимента, является временная структура выводимых пучков. На рис. 7 представлены осциллограммы, относящиеся к случаю работы внут-

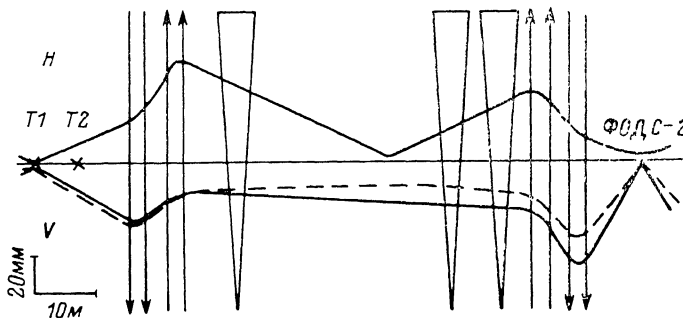


Рис. 4. Оптическая схема канала 22.

$T_1$ ,  $T_2$  — мишенные станции; сплошная линия — огибающая пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях, штриховая — огибающая пучка в вертикальной плоскости для смещенного (1.38 м) кроссовера в районе  $T_1$ .

ренних мишеней на всем плато магнитного поля ускорителя и характеризующие качество структуры выводимых пучков при одновременной работе НМВ в канал 22 (на установку ФОДС-2) и каналов вторичных частиц 2 и 4 (лучи  $a$ ,  $b$ ,  $c$  соответственно). Видно, что амплитуда временной модуляции интенсивности в сигналах сброса каналов 22 и 4 не превышает 5—10 %, а в сигнале сброса

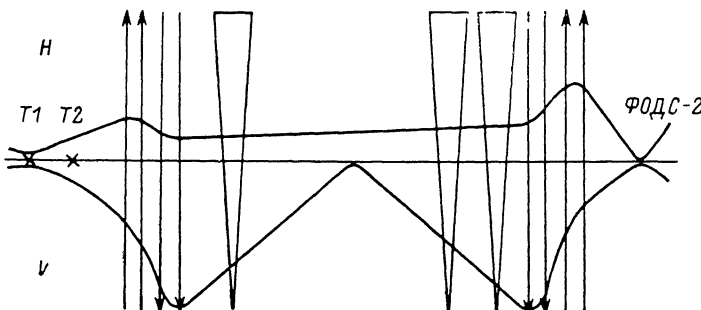


Рис. 5. Оптическая схема канала 22.

Огибающая пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

каналов 2—12 — 15 % при работе с НМВ и  $\leq 10$  % без него, т. е. даже в случаях дополнительных эффектов, таких как вывод из ускорителя доли ускоренных протонов, получивших необходимый прирост амплитуд бетатронных колебаний и не давших вклада в формирование вторичных частиц, качество структуры пучков вторичных частиц остается высоким. В свою очередь влияние работы систем наведения на частоты бетатронных колебаний ускоренного пучка не приводит к заметным изменениям структуры протонного пучка, качество которой остается существенно более высоким, чем было достигнуто до сих пор на резонансном медленном выводе (см., например, [12]). Такое высокое качество временной структуры достигнуто благодаря применению тонкой внутренней мишени, представляющей собой углеродную ткань толщиной  $\sim 50$  мг/см<sup>2</sup> [5]. При этом коэффициент качества структуры на установке ФОДС-2 составлял  $\sim 0.9$ , т. е. эффективное время вывода, характеризующее качество структуры

пучка, равнялось  $\sim 0.7$  с при длительности сброса  $\sim 0.8$  с. На рис. 8 показаны осциллограммы временной структуры пучков вторичных частиц каналов 2 и 4 (верхний и нижний лучи на рис. 8, а) и протонов, заброшенных в апертуру сеп-

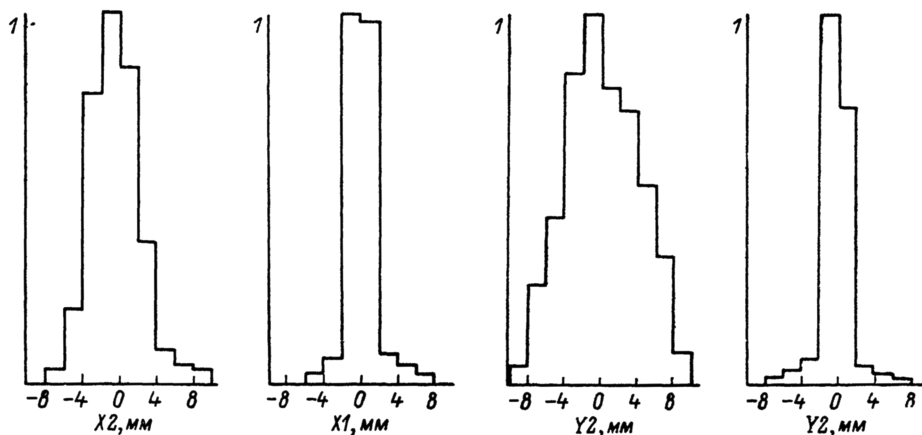


Рис. 6. Профили пучка, измеренные на расстояниях 4 м ( $X_2$ ,  $Y_2$ ) и 1.38 м ( $X_1$ ,  $Y_1$ ) от мишени экспериментальной установки.

тум-магнита СМ-18 и выводимых на установку ФОДС-2 (верхний луч на рис. 8, б) На нижнем луче рис. 8, б представлен сигнал гармоники 200 кГц, выделенный с помощью фильтра из сигнала сцинтилляционного монитора медленного вывода. Данная осциллограмма подтверждает быстрое затухание ВЧ пульсаций,



Рис. 7. Осциллограммы временной структуры при работе нерезонансного медленного вывода одновременно с каналами вторичных частиц.

а — сигнал монитора частиц, выводимых в канал 22, б — сигнал монитора вторичных частиц канала 2; в — сигнал монитора вторичных частиц канала 4. Длительность вывода вторичных частиц 1.65 с, длительность НМВ 0.75 с.

обусловленное работой тонкой мишени. В результате практически отсутствует влияние ВЧ и пульсаций на структуру выводимых пучков в течение всего времени вывода без применения специальных мер по дебанчировке пучка (типа ВЧ гимнастики и т. п.). Этот случай соответствует одновременной работе НМВ и каналов вторичных частиц после быстрого вывода (БВ), когда на равновесной орбите остаются 4—5 ускоренных банчей из 30 и в сигналах сброса наиболее

полно проявляется частота обращения пучка в ускорителе 200 кГц. Слева на всех лучах видны реакции мониторов на потери частиц при БВ.

Длительность импульса вывода пучка в канал 22 в принципе может быть такой же, как и длительность взаимодействия пучка с внутренними мишенями. В частности, установка новых септум-магнитов СМ-20 и СМ-22 позволила обеспечить растяжку пучка на ФОДС-2 до 1.2 с (рис. 8). Дальнейшее увеличение импульса вывода пучка в канал 22 ограничивается тепловыми характеристиками токовой перегородки первого септум-магнита СМ-18. Установка нового септум-

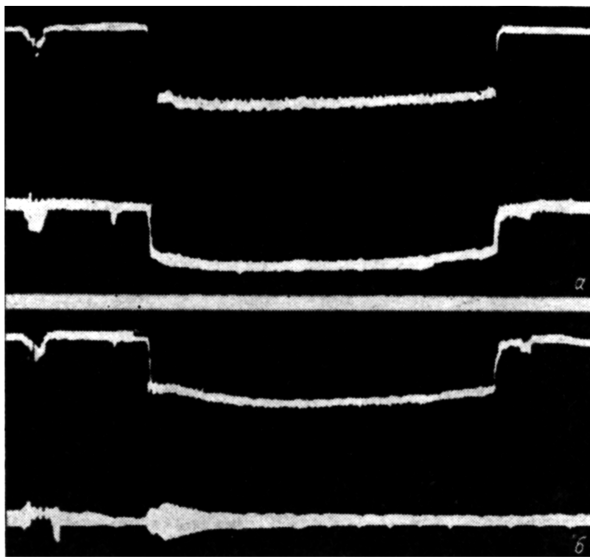


Рис. 8. Осциллограммы временной структуры при одновременной работе НМВ и каналов вторичных частиц после БВ.

а — сигналы мониторов вторичных частиц каналов 2 (верхний луч) и 4 (нижний луч); б — сигналы монитора частиц, выводимых в канал 22 (верхний луч), и затухания ВЧ структуры 200 кГц при работе тонкой мишени (нижний луч). Длительность вывода  $\approx 1.2$  с

магнита с улучшенным охлаждением позволит увеличить время НМВ до 1.5 с. Такие длительности импульсов частиц при достигнутом качестве их временной структуры полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к параметрам выводимых пучков, и обеспечивают высокую эффективность проведения физических экспериментов.

В заключение авторы приносят благодарность Р. М. Суляеву за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения, Ю. М. Адо, В. И. Котову за поддержку данной работы, начальникам смен СВ и Главного пульта ускорителя за помощь, оказанную при отладке режимов, Н. П. Волковой за помощь при подготовке работы к печати.

#### Список литературы

- [1] Абрамов В. В., Алексеев А. В., Балдин Б. Ю. и др. // Препринт ИФВЭ. № 83-16. Серпухов, 1983.
- [2] Мызников К. П., Татаренко В. М., Федотов Ю. С. Препринт ИФВЭ. № 70-51. Серпухов, 1970.
- [3] Адо Ю. М., Асеев А. А., Гришин В. Н. Препринт ИФВЭ. № 85-23. Серпухов, 1985.
- [4] Алексеев А. В., Дышкант А. С., Татаренко В. М. и др. Препринт ИФВЭ. № 78-98. Серпухов, 1978.
- [5] Адо Ю. М., Асеев А. А., Кардаш А. А. и др. Препринт ИФВЭ. № 88-9. Серпухов, 1988.
- [6] Steinbach Ch. EJ/27, CERN/MPS-CO/70-7. Geneva, 1970.
- [7] Adams J. B., Allaby J. V., Amman F. et al. // CERN MC/60. Geneva, 1970. Vol. II. P. 132.
- [8] Адо Ю. М., Людмирский Э. А. Препринт ИФВЭ. № 87-30. Серпухов, 1987.
- [9] Адо Ю. М., Дайковский А. Г., Еришов С. Ю. и др. Препринт ИФВЭ. № 87-37. Серпухов, 1987.

- [10] *Асеев А. А., Дрождин А. И., Зеленов Б. А. и др.* Препринт ИФВЭ. № 73-27. Серпухов, 1973.
- [11] *Вражнов Ю. Н., Дышкант А. С.* Препринт ИФВЭ. № 81-22. Серпухов, 1981.
- [12] *Воробьев В. К., Левин А. В., Мойжес Л. Л. и др.* Тр. X Междунар. конф. по ускорителям заряженных частиц. Серпухов, 1977. Т. II. С. 157.

Поступило в Редакцию  
30 марта 1989 г.

В окончательной редакции  
2 января 1990 г.

---