

СОСТОЯНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИФВЭ И ПЛАНЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

Ю.М.Адо, А.Г.Афонин, А.А.Журавлев, В.И.Котов, К.П.Мызников,
Э.А.Мяэ, А.А.Наумов, М.Ф.Овчинников, В.А.Тепляков,
Е.Ф.Троянов, А.В.Самойлов, Ю.С.Ходырев

Институт физики высоких энергий, г. Серпухов

ВВЕДЕНИЕ

После пуска протонного синхротрона на энергию 76 ГэВ в 1967 году программа развития ускорительного комплекса была подчинена увеличению эффективности использования пучка ускоренных протонов в физических экспериментах. Работы велись по усовершенствованию ускорителя с целью увеличения интенсивности и улучшения параметров ускоренного пучка протонов, формированию пучков вторичных частиц с помощью внутренних мишеней, созданию систем быстрого и медленного выводов протонов, созданию каналов транспортировки заряженных частиц, включая каналы сепарированных частиц и канал формирования пучка нейтрино.

Программа дальнейшего развития ускорителя связывается с повышением интенсивности ускорителя до $5 \cdot 10^{13}$ протонов в импульс после ввода в строй кольцевого инжектора-бустера на энергию 1,5 ГэВ.

УСКОРИТЕЛЬ

С целью увеличения интенсивности ускоренного пучка протонов и обеспечения хороших условий его использования в физических экспериментах на ускорителе выполнен ряд работ. В 1976 году введена в эксплуатацию аппаратура, позволяющая существенно поднять коэффициент захвата частиц в режим ускорения. Для этого перед захватом производится продольная группировка пучка частиц путем включения ВЧ напряжения на короткое время. В режиме однооборотной инжекции с малой интенсивностью группировка увеличивает коэффициент захвата в устойчивую область при равновесной фазе $\sim 70^\circ$ с 58 до 80%. Существенной особенностью такого способа захвата является также более равномерное заполнение продольного фазового пространства, что приводит к уменьшению кулоновского сдвига частот бетатронных колебаний.

Для увеличения интенсивности ускоренного пучка была также повышена амплитуда ускоряющего напряжения на 15% в начале цикла ускорения. По мере адиабатического затухания амплитуд фазовых колебаний частиц амплитуда ВЧ напряжения медленно, за время 100 мс, снижается до значения 350 кВ.

Введение в эксплуатацию предварительной группировки протонов и форсировка ускоряющих станций позволили поднять интенсивность ускорителя примерно на 25%.

Для лучшего заполнения частицами поперечного фазового пространства применяется один из двух вариантов 5-оборотной инжекции. Схема заполнения радиального акцептанса ускорителя представлена на рис. I. Величина акцептанса примерно в 2,5 раза больше эмиттанса пучка из инжектора. В варианте /а/ на период инжекции вводится локальное искажение орбиты, и инжекция всех пяти оборотов производится на одну фазовую траекторию. Расстояние между последующими оборотами определяется естественным набегом фазы бетатронных колебаний. Оптимальная амплитуда когерентных бетатронных колебаний, с которой инжектируется пучок, определяется эмиттансом инжектируемого пучка. В варианте /б/ используется ступенчатое изменение режима инфлекторной системы в процессе инжекции.

При этом I-й оборот вводится в центр акцептанса, а инжекция последующих четырех оборотов осуществляется, как в режиме /а/. Несмотря на бóльшую сложность, режим /б/ является более предпочтительным, поскольку он позволяет инжектировать на 10% больше протонов, чем вариант /а/ и обеспечивает более равномерное заполнение вакуумной камеры частицами, уменьшая тем самым влияние пространственного заряда. При токе инжектора 100 мА этот режим позволяет накопить в ускорителе до $14 \cdot 10^{12}$ протонов. Электромагнитные силы пространственного заряда пучка протонов при уровне интенсивности $\sim 5 \cdot 10^{12}$ прот/имп. сравнимы с фокусирующими силами ведущего магнитного поля. Появление большого некогерентного сдвига бетатронных частот приводит к тому, что бетатронные частоты распределяются на значительной части области устойчивости бетатронных колебаний; при этом неизбежно пересечение ряда резонансов с потерей частиц на первых 20 мс после захвата в режим ускорения.

Для уменьшения этих потерь производится коррекция наиболее сильных резонансов: $3 Q_r = 29$, $2 Q_z = 19$, $2 Q_r = 19$, $Q_r + Q_z = 19$, $Q_r - Q_z = 0,1$. Кроме того, введена динамическая коррекция градиента поля в начальной части цикла ускорения, которая устраняет смещение бетатронных частот, достигавшее ранее величины 0,15.

Для реализации многооборотной инжекции длительность тока линейного ускорителя-инжектора на энергию 100 МэВ была увеличена. В настоящее время в эксплуатационном режиме инжектор может работать с импульсным током пучка до 100 мА с длительностью до 60 мкс. Благодаря компенсации потерь ВЧ мощности на ускорение пучка, средняя энергия и энергетический спектр ускоренного пучка частиц практически не меняются в течение всего импульса инжекции. Ширина энергетического спектра на уровне 0,1 не превышает $\pm 0,34\%$ после дебанчера. Удлинение импульса инжекции потребовало увеличения длительности рабочей части импульса тока квадрупольных линз трубок дрейфа. В настоящее время длительность тока с отклонениями, не выходящими за допуск, увеличена с 30 мкс до 100 мкс. Как показывают измерения, величина нормализованного эмиттанса, усредненного по длительности импульса, отличается от мгновенного его значения (1,8 см·мрад) не бо-

лее чем на 10%. Большой вклад в улучшение стабильности и надежности работы линейного ускорителя дала разработка и внедрение нового ионного источника с холодным катодом, обладающего ресурсом более 7000 часов. Вероятность отказов в работе инжектора, усредненная за год, не превышает 1%. Значительную часть времени линейный ускоритель работает с модулированным пучком в режиме, при котором импульс тока линейного ускорителя заполнен сгустками частиц, следующими с частотой ВЧ ускоряющего напряжения протонного синхротрона 2,6 МГц. Модуляция осуществляется с помощью запирающего напряжения, подаваемого на управляющую сетку ионного источника. Режим модуляции выбирается так, чтобы снизить число частиц, которые не захватываются в режим ускорения. Это уменьшает облучение оборудования ускорителя и облегчает режим работы инжектора.

Настройка ускорителя на различные уровни интенсивности иллюстрируется рис. 2, где приведены зависимости числа ускоренных частиц от числа захваченных, снятые в 1975 и в 1976 гг. после отмеченных выше изменений. Измерения числа частиц производились соответственно через 1 мс и 1 с после инъекции. Потери частиц с ростом интенсивности связаны с кулоновским сдвигом частот бетатронных колебаний. Из рис. 2 видно, что улучшением коррекции магнитного поля, улучшением условий захвата частиц в режим ускорения удалось существенно снизить действие пространственного заряда пучка на динамику частиц.

Взаимодействие пучка протонов со стенками вакуумной камеры вызывает поперечную неустойчивость бетатронных колебаний. Неустойчивость начинает проявляться с интенсивности $5 \cdot 10^{11}$ протонов в цикле. При интенсивности $5 \cdot 10^{12}$ инкремент 10-й моды достигает $500-700 \text{ с}^{-1}$. Для подавления неустойчивости ранее использовалась узкополосная система, имевшая программную перестройку фазовых сдвигов и усиления в цепи обратной связи^{12/}. С ростом интенсивности возросли требования к точности настройки фазовой программы, что вызвало необходимость перестройки системы при изменении режимов ускорителя и усложняло её эксплуатацию. В настоящее время эта система модернизирована, и её частотный диапазон охватывает

от 8-й до 12-й гармоник бетатронных колебаний. Необходимая зависимость декремента от энергии обеспечивается программной регулировкой коэффициента усиления в цепи обратной связи. Система демпфирования практически не требует перестройки при изменении режимов работы ускорителя, в том числе при изменении интенсивности пучка.

После выключения ускоряющих станций на "столе" магнитного поля наблюдается самогруппировка пучка на частоте 2,6 МГц, приводящая к появлению сильной ВЧ структуры в пучках вторичных частиц и затрудняющая наведение пучка на внутренние мишени ускорителя. Самогруппировка подавляется путем быстрой периодической перестройки собственных частот резонаторов изменением токов подмагничивания ферритов. Система подавляет самогруппировку вплоть до достигнутой интенсивности $5 \cdot 10^{12}$ прот/цикл.

С целью дальнейшего существенного повышения интенсивности протонного синхротрона в ИФВЭ ведется сооружение нового инжекционного комплекса-быстроциклического бустерного синхротрона на энергию 1,5 ГэВ. Заполнение периметра основного ускорителя будет происходить за 30 импульсов работы бустера при постоянном уровне магнитного поля 386 Э длительностью 1,5 с. Проектная интенсивность ускорителя при работе с бустером составляет $5 \cdot 10^{13}$ прот/имп. Основные характеристики бустера приведены в работе ^{13/}. В настоящее время ведется изготовление технологического оборудования и сооружаются здания кольцевого инжектора. Ведется также подготовка основного ускорителя к работе в бустерном режиме. В частности, разрабатывается новая, более мощная ускоряющая система, формируется новый цикл магнитного поля, модернизируется система коррекции магнитного поля и вакуумная система. Начаты эксперименты по изучению динамики пучка на "плато" поля 386 Э при работе ускорителя с существующим инжектором.

РАБОТА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В физических экспериментах с электронной методикой по-прежнему широко используются внутренние мишени для генерации пучков вторичных частиц. Для формирования пучков с параметрами, предусмотренными физической программой, готовится до 40 внутренних мишеней. Интенсивность протонного пучка,

сбрасываемого на мишень, достигает $2,5 \cdot 10^{12}$ протонов в цикле. Длительность вторичных пучков достигает 1,8 с. Использование параллельно-последовательной работы мишеней совместно с быстрым выводом протонов позволяет одновременно в цикле вести до 6 экспериментов. Одним из важных параметров пучков частиц является равномерность их в течение сброса. Модуляция интенсивности вторичных частиц с частотой, равной частоте ВЧ ускоряющего напряжения, устраняется за счет остающегося импульсного разброса частиц после снятия ускоряющего напряжения. Для устранения глубокой модуляции с частотой обращения 200 кГц, возникающей при наведении пучка на внутренние мишени после срабатывания быстрого вывода, вносится дополнительный импульсный разброс с помощью возбуждения параметрического резонанса радиально-фазовых колебаний. Работа с внутренними мишенями наряду с положительными сторонами имеет весьма существенный недостаток. Он связан с тем, что практически вся энергия пучка ускоренных протонов остается в ускорителе. Это приводит к сильному радиоактивному загрязнению оборудования ускорителя и радиационному повреждению наиболее слабых узлов. Система быстрого вывода протонов используется в интервале энергий от 30 до 70 ГэВ и позволяет в каждом цикле ускорения выводить от 1 до 30 банчей первичного пучка по двум направлениям из трех^{/4/}. Вывод по направлению канала 7 используется для обеспечения экспериментальной программы на камере "МИРАБЕЛЬ", вывод по направлению канала 8 необходим для проведения нейтринных исследований, и вывод по направлению канала 9 нужен для выполнения программы физических исследований на жидководородной камере "ЛЮДМИЛА".

Учитывая, что камеры "МИРАБЕЛЬ" и "ЛЮДМИЛА" способны срабатывать два раза за цикл работы ускорителя с интервалом более 0,5 с, был осуществлен и успешно эксплуатируется трехкратный быстрый вывод. В случае двойного срабатывания камеры при максимальной энергии частиц первый вывод осуществляется на нарастающей части магнитного поля, второй - в начале стола и третий - в конце стола (рис.3а). Для обеспечения двойного быстрого вывода частиц при энергии, меньшей максимальной, используется режим захвата частиц на реверсе магнитного поля и их замедления до нужной энергии^{/5/} (рис.3б). На рис.3в показаны вертикальный и горизонтальный профили пуч-

ка на внешней мишени при первом и втором срабатывании быстрого вывода для энергий 45 ГэВ. По данным измерений центры тяжести пучков первого и второго срабатываний совпадают в пределах $\pm 0,4$ мм.

При выводе в нейтринный канал до $4 \cdot 10^{12}$ протонов за цикл потери по всей трассе канала не превышают нескольких десятых долей процента от полной интенсивности.

В течение года планируется 5 сеансов работы ускорителя со средней продолжительностью 900 часов. Между сеансами предусматриваются примерно трехнедельные остановки для профилактических работ и ремонта оборудования. Трудоемкие монтажные и строительные работы ведутся во время летней двухмесячной остановки. Как правило, на настройку ускорителя, исследование ускорителя и систем вывода отводится до 20% запланированного времени. В табл. I приведены характерные данные о работе ускорителя в 1976 году и начале 1977 года. Основной вклад в простои ускорителя вносит система питания кольцевого электромагнита, системы коррекции магнитного поля, вакуумная система и линейный ускоритель. Продолжительность IV сеанса 1976 года увеличена для проведения отладки магнитного цикла ускорителя для бустерного режима. Наибольшая интенсивность $5 \cdot 10^{12}$ протонов в импульсе получена в III сеансе 1976 года.

ПУЧКИ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ

План размещения каналов, формирующих пучки частиц на экспериментальные установки, приведен на рис.4. Занимаемая каналами и физическими установками площадь превышает 30 тыс.м² и включает в себя экспериментальный зал, галерею и три павильона пузырьковых камер. После предыдущей международной конференции по ускорителям введены в действие нейтринный канал 8/6/ и канал 18 вторичных заряженных частиц /7/, завершено сооружение каналов 19/8/ и 20.

На пучках нейтрино, формируемых в канале 8, в настоящее время проводятся исследования с использованием искрового детектора и пузырьковой камеры "СКАТ". На внешнюю мишень канала (Т) осуществляется быстрый вывод ускоренных протонов с энергией 67 ГэВ и интенсивностью до $3 \cdot 10^{12}$ прот/имп. Для уве-

Т а б л и ц а I

С Е А Н С Ы	1976 г.					1977 г.	
	I	II	III	IV	V	I	II
	22.01+28.02	19.03+25.04	20.05+26.06	15.09+05.11	21.11+29.12	20.01+28.02	21.03+28.04
Работа ускорителя на физический эксперимент (часы)	720	720	744	732	720	744	726
Работы на ускорительном комплексе (часы)	180	180	168	492	206	200	192
Общее плановое время работы (часы)	900	900	912	1224	926	944	918
Простои (%)	6,2	6,7	5,8	6,3	3,7	6,5	8,8

Максимальная интенсивность достигала $5 \cdot 10^{12}$ протонов в импульсе. Наибольшее число одновременно проводимых экспериментов 6.

личения потока нейтрино, генерируемых в мишени, вторичные частицы фокусируются системой параболических линз (ФУ). Длина распадного канала (РК) составляет 140 м, а длина мюонного фильтра (МФ), сложенного из листового стального проката, равна 62 м. Интегральный поток нейтрино на искровом детекторе достигает 10^{10} ν /цикл при уровне мюонного фона менее $1 \mu / \text{м}^2$. Максимум спектра нейтрино наблюдается при энергии 3 ГэВ.

Канал 18 позволяет формировать пучки вторичных частиц обоих знаков в среднем диапазоне импульсов (3–17 ГэВ/с). Интенсивность положительных частиц достигает 10^8 за цикл, а отрицательных – 10^5 за цикл (при энергии ускоренных протонов 70 ГэВ и сбросе на мишень 10^{12} прот). Использование мишенной станции, включающей шесть внутренних мишеней, позволяет в широких пределах менять угол образования частиц при постоянном импульсе и импульсе при постоянном угле образования.

Созданный на базе канала 8 канал 19 представляет собой двухплечевой спектрометр. Плечи располагаются под углом 90° к направлению трассы выведенного протонного пучка. Захват вторичных заряженных частиц, генерируемых на внешней мишени, осуществляется в интервале импульсов $\Delta p/p = \pm 10\%$, а рабочий диапазон по импульсу составляет 2–27,5 ГэВ/с.

В этом же районе расположен канал 20, предназначенный для исследований магнитного момента λ – гиперона с помощью эмульсионной методики.

Перечень пучков частиц, который обеспечивается на ускорительном комплексе ИФБЭ, приведен в табл. 2 и 3. (Полный перечень ссылок на оригинальные работы содержится в /9/).

Т а б л и ц а 2

КАНАЛЫ НЕСЕПАРИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЭЛЕКТРОННЫМИ МЕТОДИКАМИ

Канал	Тип частиц	Диапазон импульсов, ГэВ/с	Интенсивность за цикл при $E_p=70$ ГэВ и $I_p=10^{12}$ прот
Канал 1	нейтроны	1–70	10^7 (интегральная)
Канал 2 а)	вторичные отрицательные	35–65	10^6 – 10^4 (на $\Delta p=1$ ГэВ/с)

1	2	3	4
	б) вторичные положительные	25-70	10^5-10^7 (на $\Delta p=1$ ГэВ/с)
	в) электроны	26-45	10^6 ("-")
Канал 4	вторичные отрицательные	25-50	10^6 ("-")
Канал 6	вторичные положительные	0,8-20	10^8 ("-")
Канал II	мюоны	10-35	10^6 (интегральная)
Канал I4	а) вторичные отрицательные	40-55	10^6 (на $\Delta p=1$ ГэВ/с)
	б) вторичные положительные	30-55	10^5 ("-")
Канал I6	мюоны	14-40	10^6 (интегральная)
Канал I8	а) вторичные положительные	3-17	10^8 (на $\Delta p=0,5$ ГэВ/с)
	б) вторичные отрицательные	4-15	10^5 ("-")
Канал I9	вторичные обоих знаков	2-28	в стадии наладки
Канал 20	гипероны	I	("-")

Т а б л и ц а 3

КАНАЛЫ СЕПАРИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
НА ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕРАХ

Канал	Тип частиц	Диапазон импульсов, Гэв/с	Интенсивность за цикл
Канал 7	а) $K_{\pm}, P_{\pm}, \bar{p}$	17-42	10 (на $\Delta p=0,5$ ГэВ/с)
	б) протоны (без сепарации)	10-70	"-"
Канал 9	а) $K_{\pm}, P_{\pm}, \bar{p}$	10-25	"-"
	б) протоны (без сепарации)		
Канал 8	нейтрино	1-20	10^{10} (интегральный)

В связи с ожидаемым возрастанием интенсивности ускоряемого протонного пучка (после запуска бустера) предполагается основную часть каналов, расположенных в экспериментальном

зале, перевести на работу с внешними мишенями. Кроме того, намечено создание ряда дополнительных каналов в галерее. При этом будут использоваться два медленных вывода ускоренных протонов: в направлениях каналов 2 и 8 соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.М.Адо, В.И.Балбеков и др. Коррекция магнитного поля протонного синхротрона ИФВЭ . IV Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, т.П,М., "Наука", 1975.
2. К.Ф.Герцев, А.М.Гудков и др. Система подавления когерентной поперечной неустойчивости пучка в протонном синхротроне ИФВЭ на 76 ГэВ. Препринт ИФВЭ 74-85, Серпухов, 1974.
3. V.I.Valbekov, F.A.Vodorjanov et al. VIII Intern. Conf. on High Energy Accelerators, Geneva, 1971.
4. А.А.Асеев, А.Г.Афонин и др. III Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, т.П., стр.160, М., "Наука", 1973.
5. Г.Г.Гуров. Препринт ИФВЭ 76-156, Серпухов, 1976.
6. Д.Г.Баратов, А.П.Бугорский и др. Препринт ИФВЭ 76-84, Серпухов, 1976.
7. В.И.Белоусов, А.М.Блик и др. Препринт ИФВЭ 73-90, Серпухов, 1973.
8. В.А.Абрамов, Ю.Н.Вражнов и др. Препринт ИФВЭ 74-150, Серпухов, 1974.
9. Ю.М.Адо, А.А.Журавлев и др. Протонный синхротрон ИФВЭ на энергию 76 ГэВ. IV Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, т. I, М., "Наука", 1975.

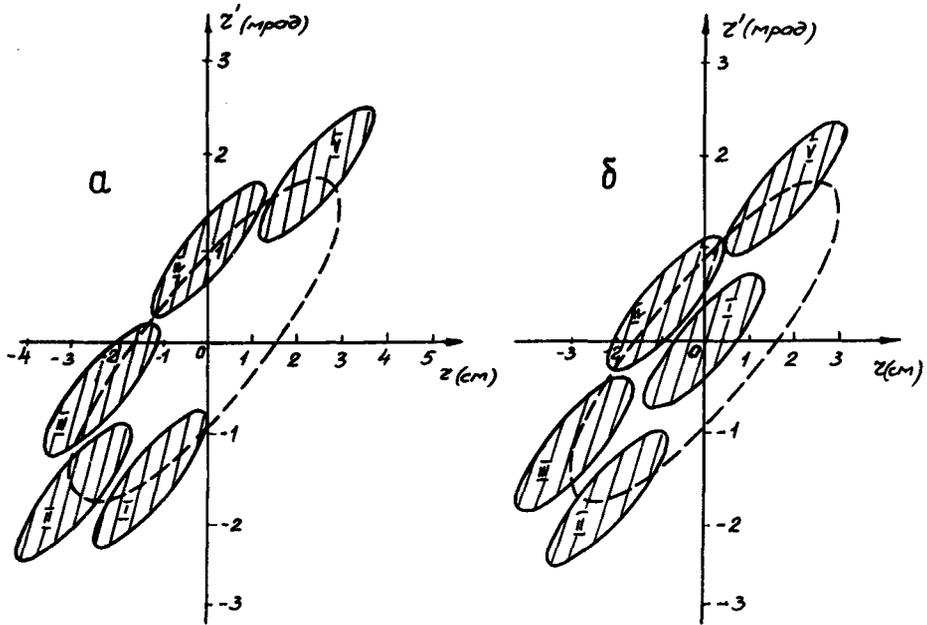


Рис. 1.

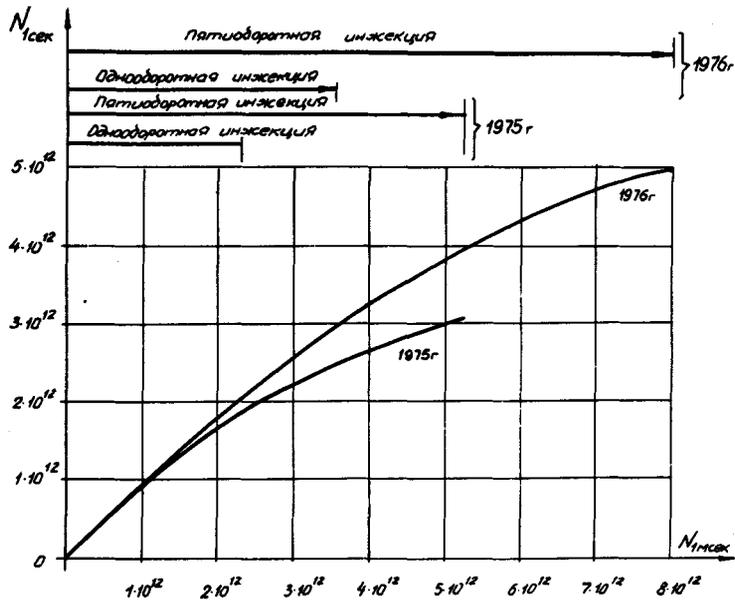
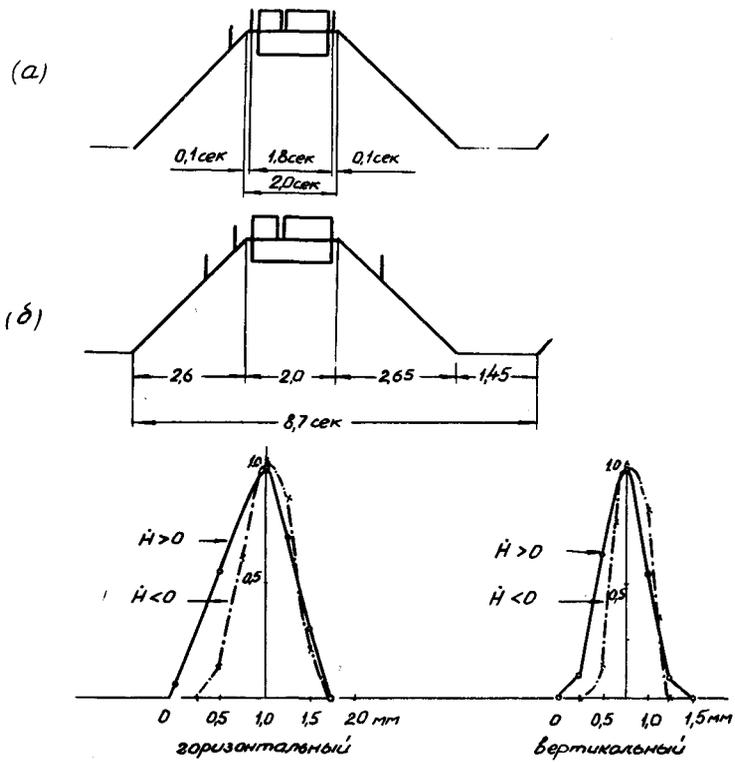


Рис. 2.



(в) Размеры пучка на внешней мишени канала ?
(Точность определения положения ц.т. пучка $\pm 0,2$ мм)

Рис. 3.

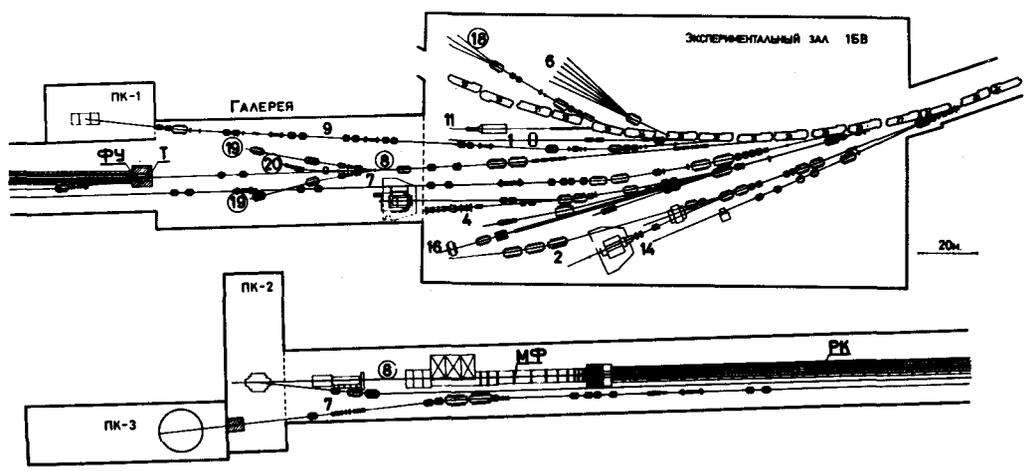


Рис. 4.

ДИСКУССИЯ

L.C.Teng: You mentioned you observed some longitudinal space-charge phenomena. What are these effects and how were they "cured" ?

Ю.М.Адо: Действие пространственного заряда на продольное движение проявляется в увеличении длины сгустка при повышении интенсивности. Этот эффект особенно заметен при переходе через критическую энергию. Для его устранения создаётся система, обеспечивающая скачок бетатронной частоты при подходе к критической энергии.

Эффект банчировки пучка на плато магнитного поля, обусловленный взаимодействием пучка и пассивных резонаторов ускоряющей системы, устранен быстрой перестройкой собственных частот резонаторов.