

5.82

+

АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

препринт 203

А.Г.Борискин, С.Б.Горячев, И.Н.Мешков

Заключительные эксперименты по получению
предельного тока в бетатроне Б-3
со спиральным накоплением

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН
ИНН №

Новосибирск
1968

+

А.Г.Борискин, С.Б.Горячев, И.Н.Мешков

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОЛУЧЕНИЮ
ПРЕДЕЛЬНОГО ТОКА В БЕТАТРОНЕ Б-3 СО СПИРАЛЬ-
НЫМ НАКОПЛЕНИЕМ

А Н Н О Т А Ц И Я

В бетатроне со спиральным накоплением при энергиях инжекции 220 и 400 кэВ в пучке электронов, циркулирующих на радиусе 85 см, получен ток 100 и 300 А, соответственно, (10^{13} и $3 \cdot 10^{13}$ частиц в импульсе). В конце цикла ускорения частицы в пучке имели энергию около 7 МэВ, размер пучка составлял ± 4 см по вертикали и ± 8 см по радиусу.

Полученные значения тока являются предельными для выбранных параметров установки и определяются условиями инжекции - энергией инжекции и размерами вакуумной камеры. Анализ зависимости тока пучка от энергии инжекции позволяет утверждать, что величина предельного тока ограничена параметрическим резонансом некогерентных бетатронных колебаний. Не было обнаружено каких-либо неустойчивостей в процессе ускорения интенсивного пучка.

A.G.Eoriskin, S.B.Gorjatshev, I.N.Meshkov

The Experiments with The Maximal Currents in
The Spiral Stacking Betatron B-3.

A b s t r a c t

The maximal currents with the injection energy 220 and 400 kev are obtained in the betatron with electron spiral stacking. The correspondent currents are equal to 100 and 300 Amps (or 10^{13} and 3×10^{13} particles for pulse), the final orbit radius was equal to 85 cm, the energy of the accelerated electrons was equal to 7 Mev. The radial and vertical beam dimensions were equal to ± 8 cm and ± 4 cm.

The obtained currents are maximal ones for our accelerator and depend on the injection conditions: the injection energy and the vacuum chamber dimensions.

The discussion of the results shows that the beam current is limited by the parametric resonance of the incoherent betatron oscillations. No instabilities were observed in the intensive electron beam acceleration.

Настоящая работа является завершением цикла исследований по созданию сильноточных бетатронов со спиральным накоплением, проводившихся с 1956 года вначале в Лаборатории Новых Методов Ускорения ИАЭ им. И.В.Курчатова, а затем в ИЯФ СО АН СССР /1-4/.

Применение высоковольтной внешней инжекции в бетатрон со спиральным накоплением позволило значительно увеличить ток в пучке ускоряемых частиц.

В таблице 1 приведены для сравнения результаты известных нам работ по созданию сильноточных бетатронов и результаты данной работы.

ТАБЛИЦА 1. Параметры сильноточных бетатронов

Литература	Энергия инжекции (кев)	радиус орбиты (см)	конечная энергия (Мэв)	Ток (Ампер)	Число частиц
/ 3 /	60	14	2,8	75	$1,3 \cdot 10^{12}$
/ 5 /	500	23,4	100	90	$2 \cdot 10^{12}$
/ 6 /		25	25	90	$3 \cdot 10^{12}$
/ 4a /	90	15	3	280	$5 \cdot 10^{12}$
	220	85	7	100	10^{13}
Данная работа	400	85	7	300	$3 \cdot 10^{13}$

На первом этапе исследований проводились эксперименты с внутренним инжектором в режиме, аналогичном / 3 /. Г.Б.Глаголевым и Б.В.Чириковым был получен ток 280А на радиусе 15 см (см. табл. 1). Первые эксперименты по осуществлению внешней инжекции в бетатрон БЗ описаны в работе / 4a /. Там же подробно описана теория бетатрона со спиральным накоплением.

В настоящей работе описываются заключительные эксперименты с внешним инжектором, в которых были получены предельные значения тока ускоренных частиц.

§ 1. Принципы работы и конструкция

бетатрона Б-3

На рис. 1 и 2 приведены общий вид и схематическое сечение бетатрона Б-3, который представляет собой индукционный ускоритель со спиральным накоплением электронов. Принцип работы бетатронов со спиральным накоплением описывался неоднократно / 1-4 / и, кратко, состоит в следующем. Электроны инжектируются на внутреннем радиусе вакуумной камеры, имеющей значительную радиальную апертуру. Ускоряясь под действием вихревого электрического поля, электроны движутся по разворачивающейся спиральной траектории в постоянном во времени магнитном поле. Через время τ после начала инжекции электроны достигнут внешнего радиуса камеры. Если в течение этого времени ток инжекции и ускоряющее напряжение изменяются достаточно мало, то вся радиальная апертура будет заполнена электронами. Изменяя магнитное поле и ускоряющее напряжение, можно подобрать такой режим ускорения, что бетатронное соотношение $2 : 1$ будет выполняться для некоторой орбиты, находящейся в пределах апертуры вакуумной камеры. В бетатроне Б-3 магнитное поле формируется профилированными полюсами магнита, а также внутренней и внешней обечайками, и имеет показатель спада $n = 0,35 \pm 0,05$ по всему объему вакуумной камеры.

Полюса магнита имеют радиальную шихтовку, они набраны из листов трансформаторной стали толщиной 0,35 мм, склеенных в пакеты, которые закреплены на несущих плитах.

Ускоряющее вихревое электрическое поле создается потоками центрального сердечника и обмоток, уложенных в двух концентрических пазах полюса магнита.

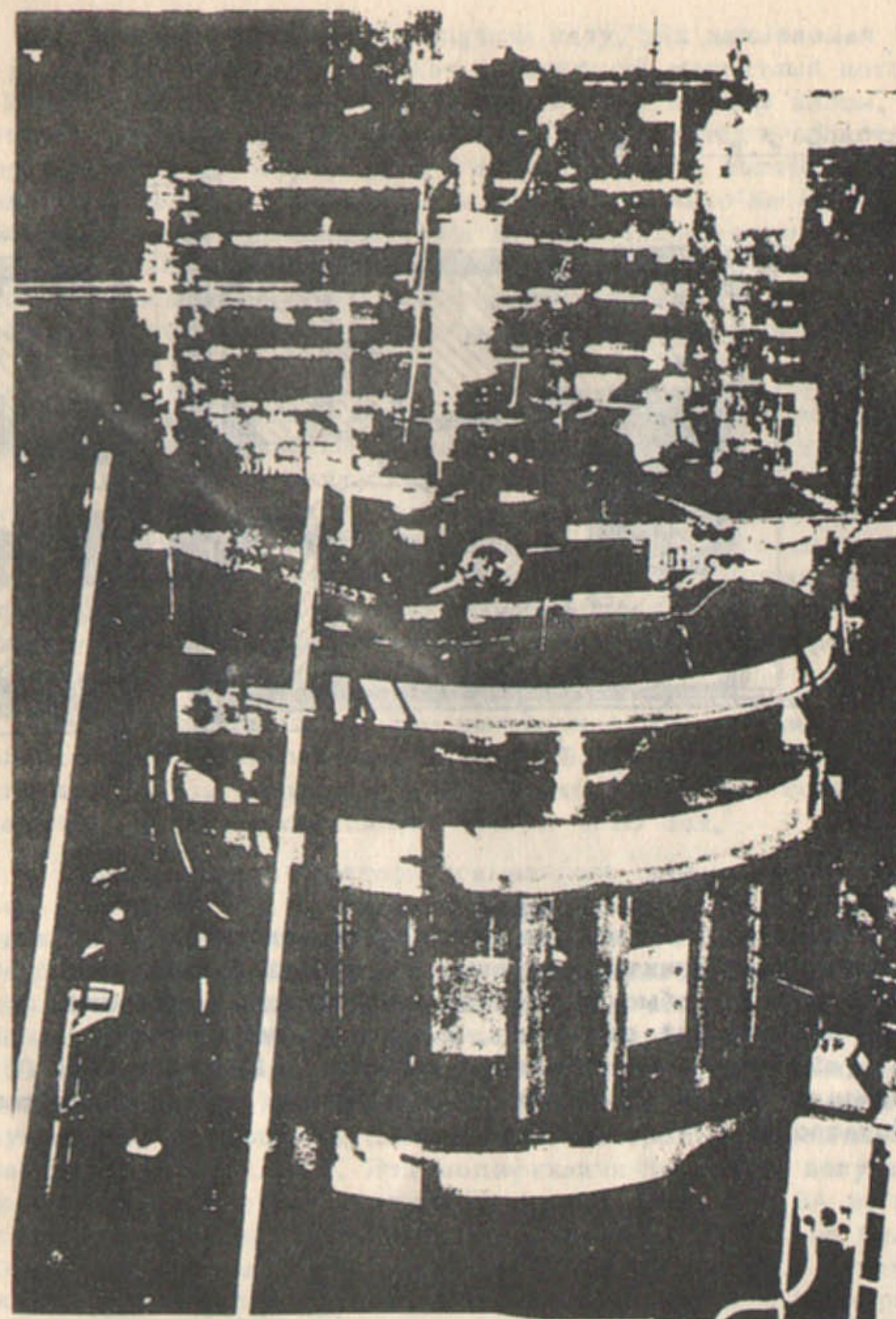


Рис.1. Общий вид бетатрона Б-3 с внешним инжектором.

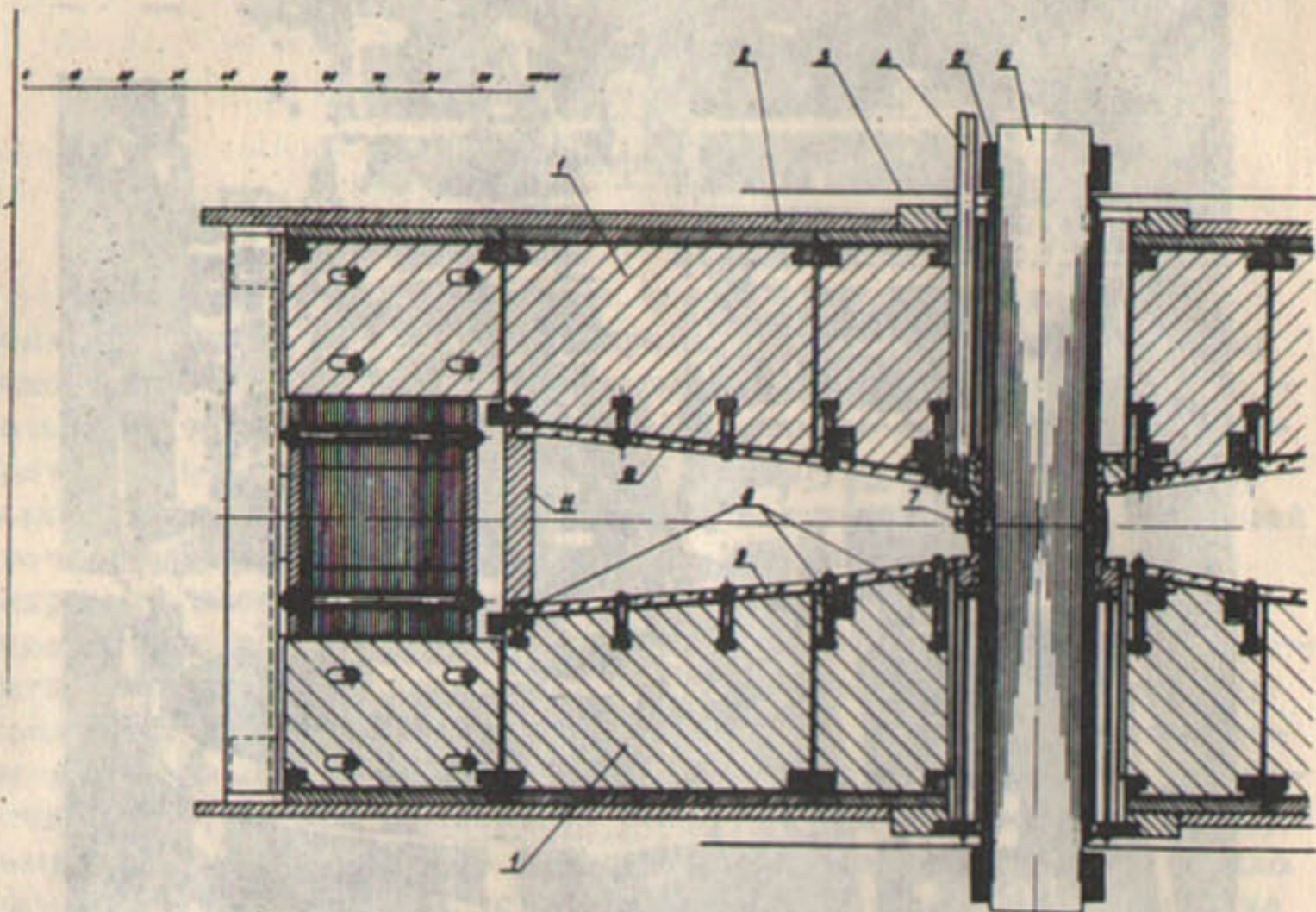


Рис. 2

- 1 - полюса; 2 - несущие плиты ярма магнита;
 3 - электромагнитные экраны; 4 - впускной канал инжектора, 5 - обмотка питания центрального сердечника
 6 - центральный сердечник, 7 - поворотный магнит,
 8 - обмотки питания полюсов магнита, 9, 10 - вакуумные крышки камеры бетатрона, 11 - наружная обечайка камеры бетатрона.

Обмотка, уложенная в первом пазу, так называемая "первая пазовая обмотка", создаёт ускоряющий магнитный поток в области между центральным сердечником и первым пазом. Вторая пазовая обмотка создаёт магнитный поток в области между первым и вторым пазами. Магнитный поток центрального сердечника создаёт ускоряющее напряжение только на время накопления и начала стягивания, пока пучок электронов не выйдет за область действия первой пазовой обмотки. Это сделано с той целью, чтобы уменьшить диаметр сердечника, так как величина накопленного заряда растёт с уменьшением радиуса инжекции $\propto 1/r_1^{n-2}$.

Рабочая область вакуумной камеры хорошо экранируется от рассеянных магнитных полей центрального сердечника. С этой целью сердечник окружён специальными медными экранами /4,7/, а его поток выведен сквозь ярмо магнита, разрезанное по диаметральной плоскости на две изолированные одна от другой половины. Для улучшения экранировки на разрезы наложены специальные медные полосы. Вихревые магнитные поля, проникавшие в камеру, не превышали в момент инжекции 5 эрст ед. при индукции в сердечнике $1,5 \cdot 10^4$ гаусс.

Питание бетатрона Б-3 импульсное, коммутация осуществлялась управляемыми воздушными разрядниками, обеспечивавшими точность включения около 1 мксек. Частота повторения рабочих импульсов составляла обычно 1/20 сек.

В качестве инжектора применялось специально разработанное устройство /8/, состоящее из высоковольтного генератора типа ГИН с закорачивающим разрядником, электронной пушки, ускорительной трубки, электронно-оптического канала, служащего для проводки пучка в камеру бетатрона и поворотного магнита. Заметим, что в отличие от работы /8/, при энергиях инжекции 150-220 кэВ инжектор работал без ускорительной трубки (последняя снималась), а при энергиях 300-400 кэВ в ускорительную трубку вставлялись специальные электроды, аналогичные описанным в работе /8/. Эти модификации позволили получить на выходе из поворотного магнита ток электронов 2-3А во всём диапазоне энергий. Длительность импульса тока можно было плавно регулировать в пределах от 5 до 100 мксек. Пучок, инжектируемый в камеру бетатрона, имел поперечные размеры порядка 8×8 мм² и угол расхождения не больше 2° .

§ 2. Эксперименты по спиральному накоплению

1. В экспериментах по накоплению изучалась зависимость тока в витке от различных параметров. Сводка экспериментальных результатов дана в таблице П. Ток измерялся графитовыми и свинцовыми пробниками. При этом учитывалась зависимость показаний пробника от материала, из которого он изготовлен - влияние рассеяния электронов назад (подробнее см. /8/). Так, для свинца и графита отношение регистрируемого тока и падающего составляет, соответственно, 0,52-0,58 и 0,95-1,0 в диапазоне энергий 250 кэв - 1 Мэв. Угловое распределение тока на выходе из магнита, которое существенно влияет на величину тока в витке, контролировалось с помощью многоламельного графитового пробника, сигналы с которого поступали на многоканальное запоминающее устройство, выдающее последовательность прямоугольных импульсов с амплитудами, пропорциональными амплитуде сигнала на входе соответствующего канала.

2. Изучалась зависимость тока в витке от условий инжекции: параметров и направления инжектируемого пучка, напряжения ускоряющего поля U_0 , расстройки ведущего поля ϵ :

$$\epsilon = \frac{H_0 + H_1}{H_0} \quad (1)$$

где H_0 - равновесное значение поля на радиусе инжекции r_1 , H_1 - фактическое значение поля на радиусе инжекции.

Было установлено, что оптимальным является случай, когда электроны инжектируются по касательной к окружности $r = r_1$ и параллельно медианной плоскости. Поворотный магнит был расположен выше медианной плоскости, поэтому частицы на выходе из него имели отклонение от медианной плоскости 0,5 см - 1,3 см в зависимости от их положения в пучке. На рис. 3 приведена зависимость тока в витке от угла между осью пучка и касательной к окружности $r = r_1$.

Предельное значение тока в витке ограничивается пространственным зарядом и растёт пропорционально /3,4/ напряжению на обходе U_0 . Поэтому можно характеризовать эффективность инжекции величиной I/U_0 , которая для предельного значения тока в витке не зависит от U_0 (ток в витке растёт

Т А Б Л И Ц А П. Эксперименты по накоплению

Энергия инжекции кэв	Ток инжекции (ампер)	U_0 (кв)	Шаг спирали (мм)	время накопления мксек	ток витка (ма)	I/U_0 ма/кв	H_1 (эрсед)	расстройка ϵ	равновесный радиус	начальная амплитуда радиальных колебаний	ПРИМЕЧАНИЕ
15	0,1	0,6	4,6	4,7	24	42					Внутренний инжектор
30	0,1	0,7	2,3	5,7	50	72		0,1			
50	0,2	0,7	1,7	7,5	80	114					Внешний инжектор
70	0,2	0,6	1,0	10,5	72	120			22 см	8 см	
90	0,3	0,6	0,8	12,5	72	120			22 см	8 см	
150	0,4	1,8	1,5	3,4	300	165	65		22 см	8 см	Внешний инжектор
220	1,2	1,0	0,85	6,1	160	160	65	0,2	22 см	8 см	
300	2,3	1,3	0,8	5,8	300	230	80	0,15	22 см	8 см	
400	3,5	2,0	1,0	4,5	600	300	100	0,17	22 см	8 см	
	3,5	2,4	0,9	4,5	1000	430	113	0,22	22 см	8 см	

линейно с ростом U_0). При малых U_0 эффективность инъекции низка из-за малого шага спирали, так что предельное значение I/U_0 , достигается при достаточно больших U_0 . Было установлено, что существует два режима инъекции:

- 1) "одночастичный", когда инжектируемый ток того же порядка, что и предельный ток в витке;
- 2) сильноточный, когда инжектируемый ток много больше предельного тока в витке.

В случае "одночастичного" режима инъекции предельное значение I/U_0 достигается только при достаточно больших значениях U_0 . (см. табл. II, 150 кэВ), причем имеет место очень острая зависимость тока в витке от величины "расстройки" поля ϵ , угла расхождения пучка на выходе из магнита и направления инжектируемого пучка. Эти результаты хорошо согласуются с представлениями об одночастичном механизме захвата частиц в режим ускорения, когда электрон, благодаря оптимально выбранным условиям инъекции, успевает совершить достаточно большое число оборотов, не попадая на стенки инфлектора; и набрать энергию для необходимого увеличения радиуса равновесной орбиты. В нашем случае эффективная толщина стенки инфлектора (стенка + размер пучка) - составляла около 10 мм, так что при шаге 1,6 мм (таб. II, 150 кэВ) требуется 6 оборотов.

В случае сильноточного режима предельное значение I/U_0 достигается при существенно меньшем напряжении U_0 (см. таб. II), а зависимость тока в витке от расстройки поля ϵ и геометрических параметров пучка становится менее острой.

Это обстоятельство было обнаружено в экспериментах на энергии инъекции 150 кэВ и позволило в дальнейшем на более высоких энергиях работать при напряжениях U_0 , значительно меньших рассчитанных на основе "одночастичного" механизма инъекции.

Влияние пространственного заряда пучка как бы увеличивают эффективный шаг спирали. В этом отношении примечательно постоянство начальной амплитуды радиальных бетатронных колебаний, рассчитанной по расстройке поля, при которой получен предельный ток в витке во всех экспериментах с внешним инжектором.

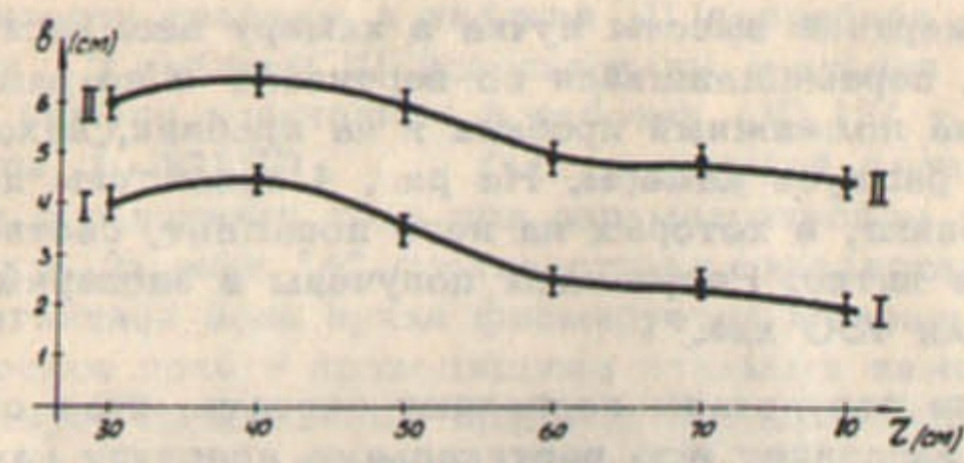


Рис.3. Зависимость тока в витке от направления инжектируемого пучка.

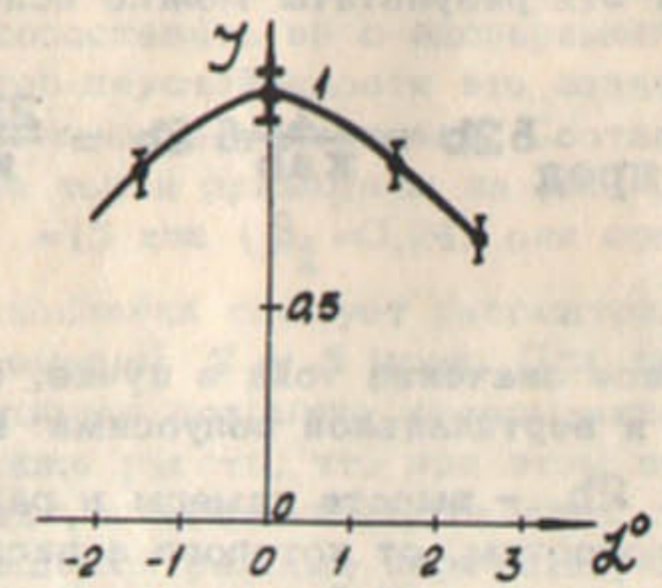


Рис.4. Измерение высоты пучка.
 1 - на подвижный пробник попадает 50% тока в витке,
 II - на подвижный пробник попадает 10% тока в витке.

3. Для измерения высоты пучка в камеру вводился подвижный пробник, перемещавшийся по вертикали и по радиусу. Измерялся ток на подвижный пробник и на пробник, находившийся на наружном радиусе камеры. На рис. 4 приведены положения подвижного пробника, в которых на него попадает, соответственно, 50% и 10% в витке. Результаты получены в экспериментах с энергией инжекции 400 кэВ.

Полученные результаты позволяют считать, что в области инжекции пучок заполняет всю вертикальную апертуру камеры.

4. Характер зависимости величины I / U_0 от энергии инжекции позволяет судить о механизме, ограничивающем предельный ток в витке. В настоящее время известен целый ряд механизмов неустойчивости пучка в кольцевом ускорителе. Результаты работ /10-15/ получены для пучка эллипсного сечения, в котором частицы имеют малый разброс скоростей. Для оценки предельного тока в витке спирали эти результаты можно использовать, если принять

$$I_{\text{витка}}^{\text{пред}} \approx \rho_{\text{пред}} \delta 2b = \frac{I^*}{\pi a b} \delta 2b = \frac{2I^* \delta}{\pi a} \quad (2)$$

где I^* - предельное значение тока в пучке, сечение которого эллипс с радиальной и вертикальной полуосями a и b , δ - шаг витка спирали, $2h$ - высота камеры в районе инжектора. Разброс частиц по скоростям, от которого зависит величина I^* , удобно выразить через радиальный размер пучка, обусловленный этим разбросом:

$$\Delta r_s = - \frac{R}{1 - \frac{n}{\gamma^2}} \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (3)$$

положив в дальнейшем $\Delta r_s = h$.

Шаг витка спирали δ вблизи инжектора дается выражением /2, 4а/

$$\delta = \frac{r_i}{1 - n} \frac{eU_0}{mc^2} \frac{1}{\beta_i \gamma_i} \quad (4)$$

Значения I/U_0 для различных видов неустойчивости сведены в таблице III (подробнее см. /4а/). В пунктах 1,2 таблицы III использованы значения I^* , вдвое больше, нежели полученные в работах /10,12/ - мы учли результат работы L. Smith /11/, в которой детально разобран механизм ограничения тока при параметрическом резонансе. В формуле пункта 2а знак "+" соответствует квазистатическому случаю - магнитное поле пучка формируется железом магнитов, а электрическое поле - проводящими стенками камеры; знак "-" соответствует переходному процессу - электрическое и магнитное поля, переменные во времени, формируются идеально проводящими стенками камеры (скин-эффект).

Формулы, сведенные в таблицы III получены в предположении $b \ll h, g$, что в нашем эксперименте не выполняется.

Поэтому вычисленные по ним абсолютные значения предельного тока витка следует рассматривать как оценку по порядку величины. Однако, из них можно получить зависимость предельного тока от энергии и сопоставить её с экспериментальными результатами. Для всех видов неустойчивости эта зависимость почти не связана с геометрией камеры ускорителя. Соответствующие кривые и экспериментальные точки приведены на рис. 5. Нормировка такова, что в точке $W_i = 15$ кэВ ($\beta_i = 0,24$) они совпадают.

Процесс накопления следует рассматривать как переходный с характерным временем $\tau \sim 5$ мсек. Для таких времён скин-слой в графите (проводящее покрытие камеры-аквадаг) составляет около 1 мм. Если также учесть, что при этом имеет место нестационарный скин-эффект, а направление силовых линий магнитного поля пучка в установившемся режиме перпендикулярно стенкам камеры, то можно считать, что при $t \leq \tau$ магнитное поле пучка формируется проводящими стенками камеры, и в формуле 2а следует взять знак "-". Тогда для $g \sim h$ формулы 1 и 2а имеют одинаковую зависимость от энергии.

Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую, соответствующую формулам 1,2а. Абсолютное значение предельного тока витка для $W_i = 400$ кэВ, рассчитанное по формуле 2а при $r_i = 22$ см, $b = h = 5$ см, $a \gg b$, $n = 0,35$, $n_{\text{рез}} = 0,25$ составляет 550 мА/кв, что хорошо согласуется с экспериментальным результатом 430 мА/кв.

ТАБЛИЦА III Предельный ток витка при накоплении.

Вид неустойчивости	$\frac{e}{mc^3} \cdot I_{\text{витка}}^{\text{пред}} / \frac{eU_0}{mc^2}$
1. Параметрический резонанс /10/.	$\frac{n - n_{\text{рез}}}{1 - n} \cdot \frac{\beta_i \gamma_i^2}{\pi} \cdot \frac{b}{r_i} \cdot \frac{a + b}{a}$
2 То же - с отражениями в крышках /12/ а) некогерентные колебания б) когерентные колебания	$\frac{n - n_{\text{рез}}}{1 - n} \cdot \frac{\beta_i \gamma_i^2}{\pi} \cdot \frac{b}{r_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 b(h+b)}{24h^2} \cdot \gamma_i^2} \cdot \left(1 \pm \beta_i^2 \cdot \frac{h^2}{g^2} \right)$ $\frac{n - n_{\text{рез}}}{1 - n} \cdot \frac{16\beta_i}{\pi^2} \cdot \frac{h}{r_i}$
3. Диссипативная поперечная неустойчивость /13/	$\frac{\sqrt{n}}{1-n} \cdot \left(1 - \frac{1-n}{2\gamma_i} \right) \cdot \frac{\beta_i \gamma_i^2 \cdot b(h+b) \cdot (kR)}{2\pi r_i^2 \left(1 - \frac{\pi^2 b(h+b)}{24h^2} \right)}$
4. Поперечная плазменная неустойчивость /14/	$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot \frac{\beta_i}{2\pi} \cdot \frac{b(h+b)}{r_i h}$
5. Эффект "Отрицательной массы" /15/	$\frac{\beta_i \gamma_i^2}{4\pi} \cdot \frac{h}{r_i} \cdot \frac{1 - \frac{1-n}{\gamma_i^2}}{1 - \frac{h}{h+b} \left(1 - 2 \cdot \frac{1-n}{\gamma_i^2} \right)}$

2a - радиальный размер пучка.

2h, 2b - вертикальный размер вакуумной камеры и пучка, соответственно.

2g - расстояние между полюсами магнита.

r_i - радиус инжекции.

n, n_{рез} - показатель спада магнитного поля и его резонансное значение.

N_e, N_i - плотность электронов и ионов в пучке, α = N_i/N_e.

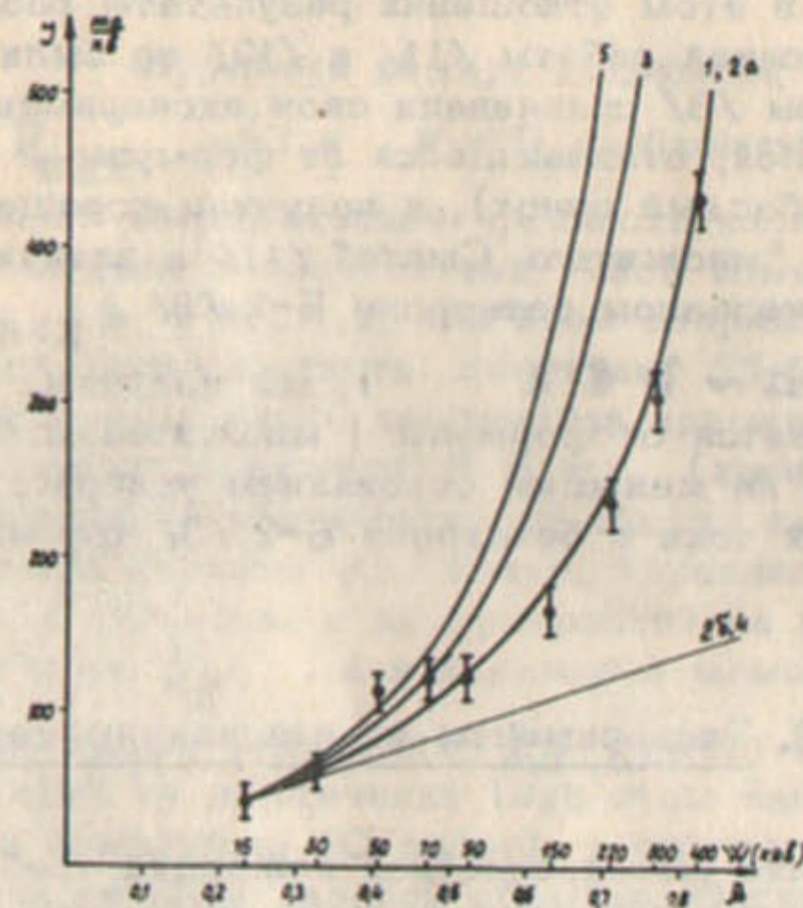


Рис.5. Сопоставление экспериментальных данных по накоплению с расчётными.

1, 2a - параметрический резонанс некогерентных бетатронных колебаний (функция $\beta \gamma^2$);

2b - параметрический резонанс когерентных бетатронных колебаний (функция β);

3 - диссипативная поперечная неустойчивость (функция;

$$\beta \gamma^2 \left(1 - \frac{1-n}{\gamma^2} \right));$$

4 - поперечная плазменная неустойчивость (функция β);

5 - эффект отрицательной массы (функция $1 - \frac{1-n}{\gamma^2}$).

$$\beta \gamma^2 \cdot \frac{1 - \frac{1-n}{\gamma^2}}{\frac{1}{2} + \frac{1-n}{\gamma^2}}$$

Любопытны в этом отношении результаты работы / 3 /. В момент её написания работы /11/ и /12/ не были еще известны, поэтому авторы /3/ сравнивали свои экспериментальные результаты с формулой, отличающейся от формулы 1 табл. Ш множителем 1/2 (свободный пучок), и получили хорошее согласие. Однако, учитывая "множитель Смита" /11/ и влияние проводящих стенок в безжелезном бетатроне Б-2 /3/ ($\epsilon = \infty$, $\gamma_i \cong 1$, $h \sim b \ll a$), мы получим, что формула 2а табл. Ш отличается от формулы 1 множителем 0,55. Таким образом, можно с не меньшим основанием утверждать, что механизм ограничения тока в бетатроне Б-2 /3/ тот же, что и в нашем случае.

§ 3. Эксперименты по стягиванию тока

1. Применение высоковольтной инжекции требует больших напряжений ускоряющего вихревого поля U_0 при накоплении. При стягивании величина этого ускоряющего напряжения должна быть приведена в соответствие с величиной скорости нарастания ведущего магнитного поля.

Если $V_{уск}$ - ускоряющее напряжение, созданное на обходе камеры потоком центрального сердечника или пазовой обмотки, а $V_{вед}$ - потоком ведущего магнитного поля, то радиус $R_{ст}$, к которому стягиваются накопленные частицы, есть /3,4а/

$$R_{ст} = r_i (1-n)^{-1/2-n} \left\{ \frac{\int_{\tau}^t V_{уск} dt}{\int_{\tau}^t V_{вед} dt} \left[\left(\frac{R}{r_i} \right)^{2-n} - 1 \right] - 1 \right\}^{\frac{1}{2-n}} \quad (5)$$

Если $V_{уск}$ и $V_{вед}$ одинаково зависят от t или если $t - \tau$ много меньше периодов изменения напряжений, то

$$\frac{V_{уск}}{V_{вед}} = \frac{\left(\frac{R}{r_i} \right)^{2-n} (1-n) + 1}{\left(\frac{R_{max}}{r_i} \right)^{2-n} - 1} \quad (6)$$

где R_{max} - наружный радиус вакуумной камеры. При $n = 0,35$, $R_{max} = 80$ и $R = 70$ необходимо $V_{вед} = 2V_{уск}$

Ограниченная электрическая прочность изоляции обмоток, разрезов ярма магнита и обечаек вакуумной камеры не позволяла получить $V_{вед} > 6$ кв, т.к. при этом напряжение, трансформирующееся в обмотках магнита, достигает 25 кв. Поэтому для питания обмотки центрального сердечника применялась схема (рис. 6), позволявшая в момент $t = \tau$ (конец накопления) сбрасывать ускоряющее напряжение на обходе камеры от U_0 до заданного значения порядка 300 вольт. Управляемые разрядники срабатывали в соответствии с их нумерацией на рис. 6; в момент $t = \tau$ срабатывал P_2 , а в некоторый момент $t_1 = \tau + t$ 60 мксек, срабатывал разрядник P_3 , почти полностью снижавший напряжение на сердечнике (при этом напряжение на обходе камеры не превышало 20 вольт), и одновременно с ним - разрядник в цепи питания пазовой обмотки. Осциллограмма ускоряющих напряжений сердечника и пазовой обмотки приведена на рис. 7. Момент t_1 , выбирался так, чтобы частицы успевали выйти за радиус 50 см - область действия пазовой обмотки.

Применение описанной схемы позволило осуществлять стягивание практически без потерь частиц в отличие от / 4,4а/.

2. В экспериментах по стягиванию зависимости от времени $V_{уск}$ и $V_{вед}$ (т.е. $\Delta \Phi_{уск}$ и $H_i(t)$) подбирались таким образом, что при $V_{уск} \rightarrow 0$ радиус стягивания двигался наружу и стянутый ток сбрасывался на пробник, помещенный на радиусе $R = 80$ см.

Сброс на пробник, производившийся в конце цикла ускорения, позволяет вычислить стянутый ток по полному сброшенному заряду:

$$I_{ст} = \frac{c}{2\pi R_{ст}} \int_{t_1}^{t_2} I_{пр} dt \quad (7)$$

где $I_{пр}$ - ток на пробник, $t_2 - t_1$ - время сброса.

Существенным недостатком метода является неопределенность эффективности пробника. Последняя зависит от условий

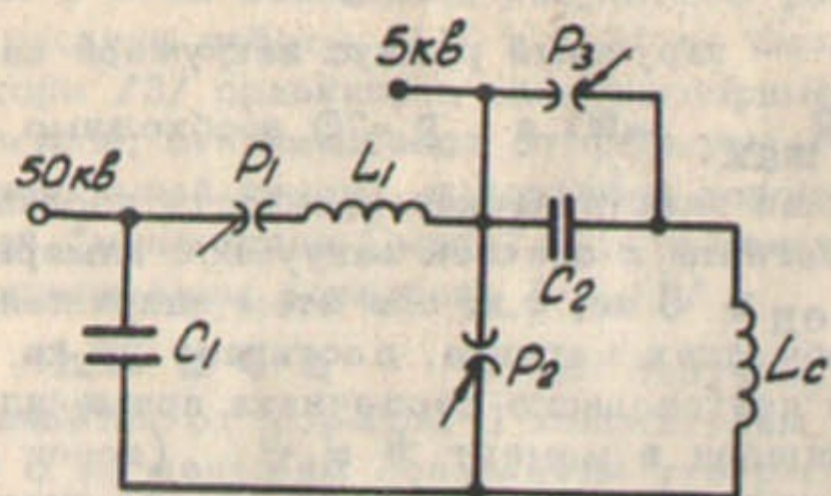


Рис. 6. Схема питания обмотки центрального сердечника.



Рис. 7. Осциллограмма ускоряющих напряжений. (Развертка 20 мксек/см.)

сброса (величины шага радиуса равновесной орбиты за оборот) и от материала пробника. Обычно применялись пробники из свинца, т.к. лёгкие металлы при равной толщине "прозрачны" для электронов с энергией выше 5 Мэв. Ток, циркулирующий в камере, измерялся пикап-электродом, который представлял собой две проволочные гребенки ($\phi = 0,1$ мм), натянутые на каркасе из оргстекла и помещенные над и под медианной плоскостью на высоте ± 9 см. Пикап крепился на окне обечайки камеры и имел протяженность по радиусу от $r = 92$ см до $r = 82$ см. Для уменьшения емкостной связи с крышками камеры и железом ярма гребенки сделаны двухярусными - с внутреннего, ближнего к пучку, яруса снимается сигнал, а наружный соединен с обечайкой и аквадагом каркаса пикапа. Это ослабляет наводку от $V_{вед}$ в 5 раз.

Для рассеянных электронов пикап прозрачен, что подтверждается зависимостью выходного сигнала от параметров RC - цепочки: при $R_{вых} \cdot C_{вых} \gg T_{уск}$ величина сигнала не зависит от $R_{вых}$ и обратно пропорциональна $C_{вых}$.

Пикап градуировался на модели пучка: в камеру помещалась свернутая из фольги модель пучка, на нее подавался прямоугольный импульс напряжения, чувствительность оценивается по формуле:

$$\frac{I}{V_{вых}} = \frac{cC_0}{l} \cdot \frac{V_0}{V_{вых}} \quad (8)$$

где l - длина "пучка" в см., $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек., C_0 - ёмкость "пучка на камеру, V_0 - амплитуда импульса калибровочного генератора. Полученная таким образом чувствительность пикапа была равна 50 а/в. Следует отметить, что величина сигнала с пикап-электрода, наведенного зарядом, циркулирующим внутри него при накоплении, хорошо согласуется с величиной тока в витке:

$$V_{вых} = \frac{1}{50 \text{ а/в}} \cdot I_{витка} \cdot \frac{\Delta r}{\delta} \quad (9)$$

где δ - шаг спирали, Δr - радиальная протяженность пикапа, $I_{витка}$ - ток витка, измеренный графитовым пробником.

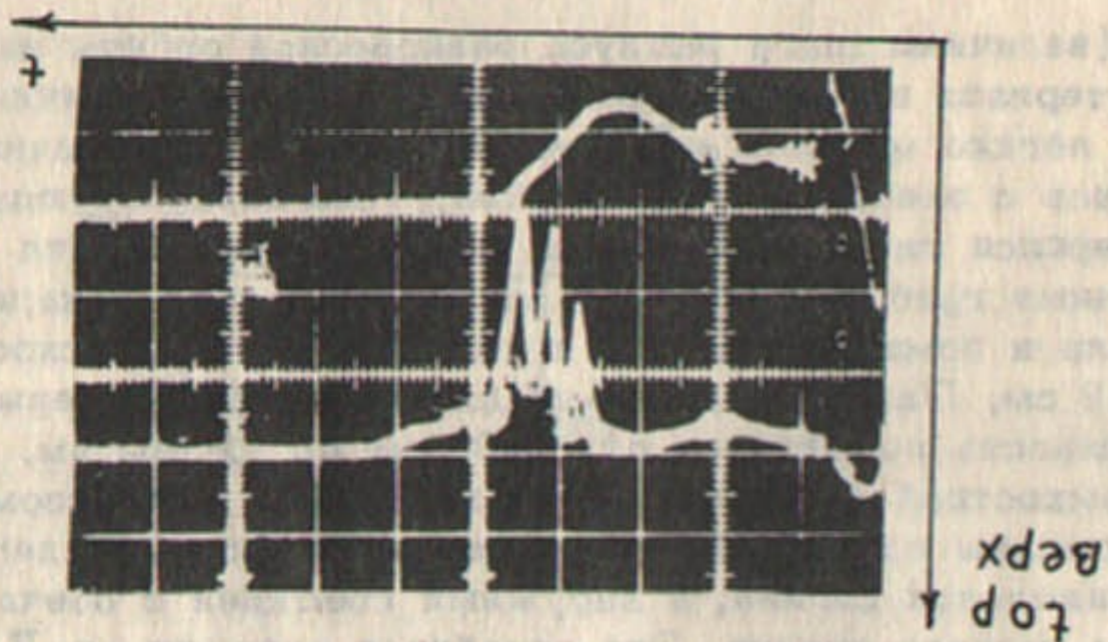


Рис.8. Осциллограммы сигналов с пробника (верхний луч, сброшенный ток около 250А) и пикап электрода (чувствительность 200 А/см). Развертка 50 мксек/см.

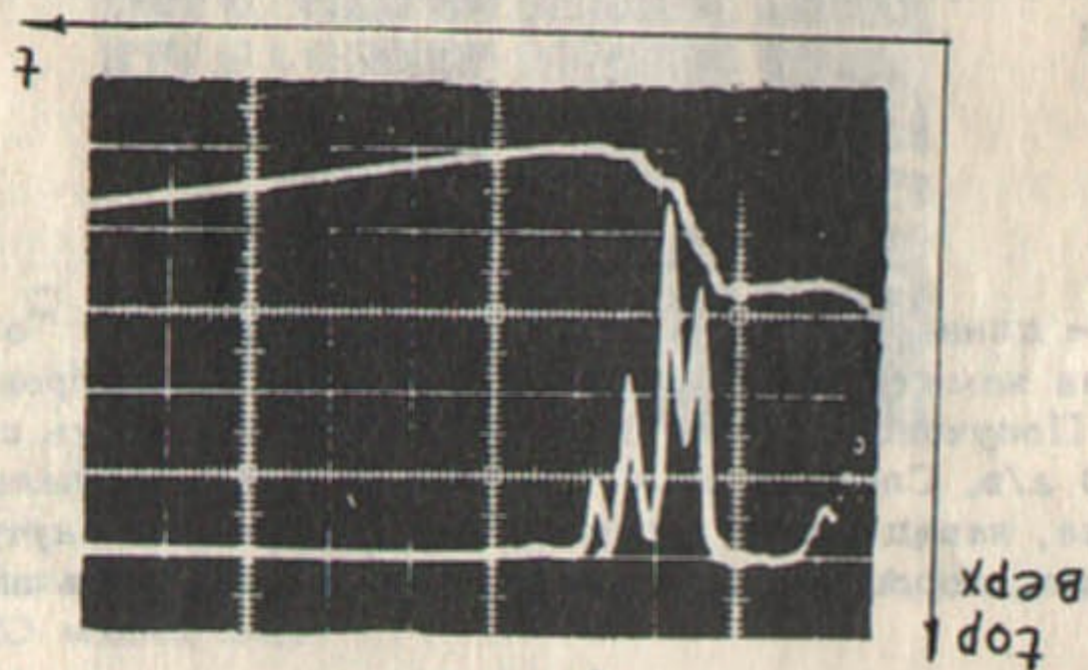


Рис.9. Осциллограммы сигналов с пробника до и после интегратора (нижний луч, чувствительность 150 А/см). Развертка 50 мксек/см.

На рис. 8 и 9 приведены осциллограммы сигналов с пикап-электрода и пробника, а на рис. 10 - зависимость между величинами этих сигналов в экспериментах с энергией инжекции 220 кэВ.

Максимальные значения стянутого тока составляли при энергиях инжекции 220 кэВ и 400 кэВ, соответственно 100А и 300А ($3 \cdot 10^{13}$ частиц в импульсе).

3. Энергия сброшенных частиц определялась по величине магнитного поля на радиусе пробника в момент сброса и составляла обычно около 7 МэВ.

4. Вертикальный размер пучка в стягивании, определенный по той же методике, что и в накоплении, составлял около ± 4 см.

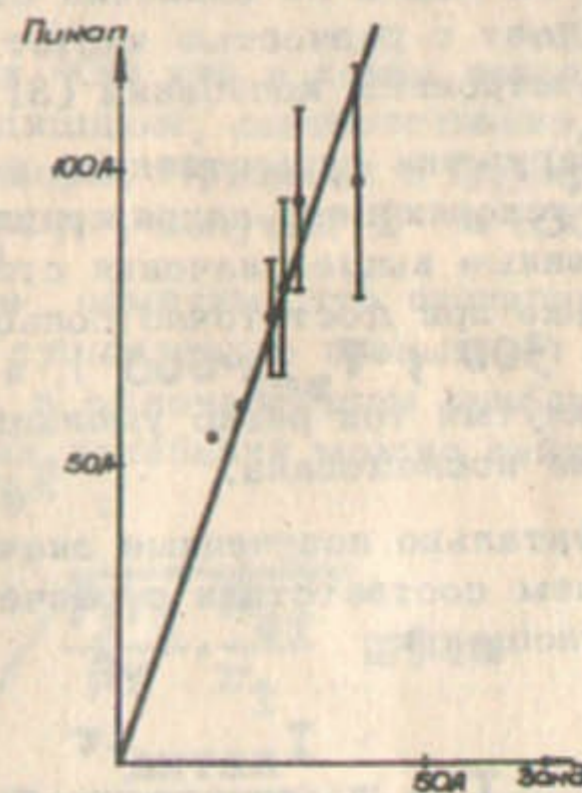


Рис.10. Соотношение значений стянутого тока, измеренных пробником и пикап-электродом. Энергия инжекции 220 кэВ.

Радиальный размер пучка Δr зависит от разброса энергий частиц в пучке и от амплитуды бетатронных колебаний частиц. Измеряя экспериментально величину изменения начального момента сброса частиц Δt при сдвиге пробника по радиусу на расстояние ΔR , а также принимая амплитуды вертикальных и радиальных колебаний частиц примерно равными друг другу и полувысоте пучка b , получим:

$$r \approx 2b + \frac{\Delta R}{\Delta t} \cdot T \quad (10)$$

Полученный таким образом полный радиальный размер пучка при энергии инжекции 400 кэВ составлял около 16 см.

5. Сброс пучка на пробник сопровождался появлением в.ч. сигнала с пикап электрода, если последний имел достаточно малую постоянную времени ($R_{\text{вых}} \sim 75 \text{ ом}$). Частота этого сигнала равнялась 25 мгц и не зависела от величины тока. Она хорошо совпадает с разностью частот обращения (53 мгц) и вертикальных бетатронных колебаний (31 мгц).

6. Была обнаружена существенная зависимость величины стянутого тока от ускоряющего напряжения (скорости стягивания). Так, приведенные выше значения стянутого тока удавалось получить только при достаточно больших значениях напряжений ($V_{\text{уск}} \sim 300$, $V_{\text{вед}} \sim 600$), а при напряжениях втрое меньших стянутый ток резко уменьшался. Подробно причина этого явления не исследована.

7. Экспериментально полученные значения стянутого тока находятся в хорошем соответствии с расчетными значениями, полученными из соотношения.

$$I_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{витка}} \cdot \tau}{2\pi R} \cdot c \quad (11)$$

где τ - время накопления /2/:

$$\tau = \frac{2\pi r_1 \cdot mc^2}{c \cdot eU_0} \cdot \beta_1 \gamma_1 \cdot \frac{1-n}{2-n} \left[\left(\frac{R_{\text{max}}}{r_1} \right)^{2-n} - 1 \right] \quad (12)$$

Принимая $r_1 = 22 \text{ см}$ и $R_{\text{max}} = 82 \text{ см}$ (радиус пробника минус амплитуда радиальных бетатронных колебаний), получим для 220 и 400 кэВ, соответственно, $\tau \cdot U_0 = 7 \text{ мксек} \times \text{кВ}$ и $10,5 \text{ мксек} \times \text{кВ}$. Используя экспериментальные значения для $I_{\text{витка}}/U_0$ из таблицы II) находим значения стянутого тока 100 и 300 А. Таким образом, стягивание пучка осуществлялось без существенных потерь частиц.

8. В процессе стягивания наступает такой момент, когда поля пучка не экранируются проводящим покрытием камеры, а формируются железом магнитов. Это приводит к существенно-му уменьшению предельно-допустимого тока (формула 2а, таб. III, знак "+"). Уже при $\gamma \sim 2$ выражение для предельно-допустимой величины тока можно представить в виде (считая $g \sim h$)

$$I \approx \frac{mc^3}{e} \cdot \frac{n - n_{\text{рез}}}{2} \cdot \gamma \left(\frac{h}{R} \right)^2 \quad (13)$$

При энергии инжекции 400 кэВ в конце накопления $\gamma = 1,8$ и 5 для электронов, находящихся, соответственно, на внутреннем и внешнем радиусах камеры. Принимая в формуле (13) $h \sim 12 \text{ см}$, $R \sim 85 \text{ см}$, $n - n_{\text{рез}} = 0,1$, получим $I \approx 300 \text{ А}$ при $\gamma = 1,5$.

9. В заключение отметим, что экспериментально полученный размер пучка не существенно превышает его расчетное значение. Действительно, в одночастичном приближении изменение амплитуды бетатронных колебаний можно найти из адиабатического инварианта $\gamma \omega b^2$:

$$b = b_1 \sqrt{\frac{\beta_1 \gamma_1 \cdot R_{\text{ст}}}{\beta \gamma \cdot r_1}} \approx 5 \text{ см} \quad (14),$$

а размер пучка, обусловленный разбросом энергий частиц, из соотношения /3/

$$\Delta r = \frac{R_{\text{ст}}}{2-n} \cdot \frac{\beta_1 \gamma_1}{\beta \gamma} \left(\frac{r_1}{R_{\text{ст}}} \right)^{1-n} \cdot \left[\left(\frac{R}{R_{\text{ст}}} \right)^{2-n} - \left(\frac{r_1}{R_{\text{ст}}} \right)^{2-n} \right] = 2 \text{ см} \quad (15)$$

Таким образом, полный расчетный радиальный размер пучка составляет 12 см.

Авторы пользуются приятной возможностью выразить свою признательность Г.И.Будкеру и А.А.Наумову за постоянное внимание к работе, Б.В.Чирикову, Г.Б.Глаголеву, Г.Н.Кулипанову и А.Н.Скринскому за ценные советы и обсуждения, В.М.Белейчеву за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, А.А.Наумов - доклад на конференции ЦЕРН, Женева, 1956.
2. И.М.Самойлов, А.А.Соколов - ЖТФ, 34, № 6 (1964), 1957.
3. Е.А.Абрамян, Г.И.Будкер, Г.Б.Глаголев, А.А.Наумов - ЖТФ 35, № 4 (1965), 605
4. Г.И.Будкер и сотр. - в кн. "Международная конференция по ускорителям". (Дубна, 1963). Атомиздат 1964г., стр. 1065.
- 4а. Р.Г.Бикматов, А.Г.Борискин, Г.Б.Глаголев, С.Б.Горячев, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, Е.А.Печерский, Б.В.Чириков - запуск бетатрона Б-3 с внешним инжектором: препринт № 104 ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 1967 г.
5. А.И.Павловский, Г.Д.Кулешов, Г.В.Склизков, Ю.А.Зысин, А.И.Герасимов - ДАН, 160 № 1, 68 (1965).
6. А.А.Воробьев, В.А.Москалев, Ю.М.Скворцов, Б.В.Окулов, А.М.Служкий, В.Г.Шестаков - известия ВУЗ'ов "физика" № 4 (1967), 139.
7. Е.А.Абрамян, Л.Н.Бондаренко, В.И.Волосов, А.А.Наумов, Б.В.Чириков - ПТЭ № 1, 1965. Стр. 178.
8. С.Б.Горячев, И.Н.Мешков - А.Э. 21, № 1 (1966), 43.
9. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман - А.Э. 23 № 1 (1967), 44.
10. И.М.Капчинский - А.Э. 13, № 3 (1962), 235; Дж.Ливингуд - "Принципы работы циклических ускорителей". И.Л., 1963.
11. L. Smith - в кн. "Международная конференция по ускорителям" (Дубна, 1963) Атомиздат. 1964г., стр. 897.
12. L.I.Laslett - Proc. of the Brookhaven Summer Study on Storage Rings, Accelerators and Experimentation at Super-High Energies (BNL - 7534, 1963), 324 .
13. В.В.Мазепус, Б.В.Чириков - А.Э. 20, № 4 (1966), 340.

14. Б.В.Чириков - А.Э.19, № 3 (1965), 139.
15. К.Нильсен, Э.Сесслер, К.Саймон - **Proc. Intern. Conf. on High Energy Accelerators and Instrumentation (CERN, 1959)**, 239; перевод в сб. "Накопление релятивистских частиц" (Госатомиздат, 1963), 133.

Ответственный за выпуск А.И.Аренштам
 Подписано к печати 29.1У-1968г.
 Усл. 1,2 печ.л., тираж 250 экз.
 Заказ № 203, бесплатно.

Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР