

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



15/1-79
P9 - 11903

Б - 399

165/2-79

Ю.Д.Безногих, А.Г.Бонч-Осмоловский, М.А.Воеводин,
Л.П.Зиновьев, В.А.Мончинский, В.А.Попов,
И.Н.Семенюшкин, А.П.Царенков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ПО ПОВЫШЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ
УСКОРЯЕМЫХ ПУЧКОВ В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ
И ИХ АНАЛИЗ

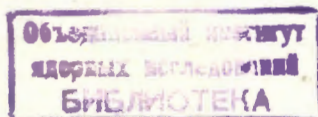
1978

P9 - 11903

Ю.Д.Безногих, А.Г.Бонч-Осмоловский, М.А.Воеводин,
Л.П.Зиновьев, В.А.Мончинский, В.А.Попов,
И.Н.Семенюшкин, А.П.Царенков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ПО ПОВЫШЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ
УСКОРЯЕМЫХ ПУЧКОВ В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ОИЯИ
И ИХ АНАЛИЗ

*Направлено на VI Всесоюзное совещание
по ускорителям заряженных частиц /Дубна, 1978/*



Безногих Ю.Д. и др.

P9 - 11903

Экспериментальные результаты по повышению интенсивности ускоряемых пучков в синхрофазотроне ОИЯИ и их анализ

Излагаются технические мероприятия по усовершенствованию систем синхрофазотрона, в результате которых были достигнуты интенсивности $4,5 \cdot 10^{12}$ ч/имп. при ускорении протонов, $3 \cdot 10^{11}$ ч/имп. при ускорении дейтронов и $2 \cdot 10^{10}$ ч/имп. при ускорении альфа-частиц. Обсуждаются результаты экспериментальных и теоретических исследований, анализ которых позволил уточнить предельную интенсивность синхрофазотрона (10^{13} ч/имп. при энергии инжекции 20 МэВ) и наметить пути дальнейшего повышения интенсивности ускоряемых пучков.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Beznogikh Yu.D. et al.

P9 - 11903

Results of Experiments on Increasing the Intensity of Beams Accelerated in JINR Synchrophasotron and Their Analysis

Technical measures aimed at the improvement of synchrophasotron systems are described. As a result, intensities of $4.5 \cdot 10^{12}$ particles/pulse for proton acceleration, $3 \cdot 10^{11}$ particles/pulse for deuteron acceleration and $2 \cdot 10^{10}$ particles/pulse for alpha-particle acceleration were achieved. The results of experimental and theoretical investigations are discussed, which analysis allowed to define a limit intensity of the synchrophasotron (10^{13} particles/pulse at 20 MeV injection energy) and to outline the ways for further increasing of the intensity of beams under acceleration.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

В течение последних лет на синхрофазотроне ОИЯИ был проведен ряд усовершенствований ускорительного комплекса и выполнены экспериментальные и теоретические исследования, которые позволили, с одной стороны, выявить основные причины потерь пучка и поднять интенсивность по протонам до уровня $4,5 \cdot 10^{12}$ р/имп. и, с другой стороны, наметить пути дальнейшего повышения его интенсивности. Кроме того, получены интенсивные пучки дейтронов и α -частиц, с помощью которых проведен целый ряд интересных физических экспериментов.

1. РАБОТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УНИВЕРСАЛИЗАЦИИ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

а/ С целью получения интенсивных протонных пучков на выходе ЛУ-20 - инжектора синхрофазотрона - была увеличена вводимая в резонатор ЛУ-20 в.ч. мощность до 5 МВт в импульсе, что позволило получить ускоренный протонный пучок с током в импульсе 50 мА при длительности импульса 600-700 мкс^{1/1}.

б/ Для повышения эффективности захвата пучка в режим ускорения был разработан и установлен на входе ЛУ-20 широкоапертурный группирователь, который увеличил угол захвата до 180° на всех ускоряемых пучках, что в 2 раза увеличило интенсивность протонного и ядерного пучков на выходе линейного ускорителя и соответственно в кольце синхрофазотрона^{2/}.

в/ Чрезвычайно важное значение для уменьшения темпа роста потерь пучка в кольце синхрофазотрона из-за пересечения рабочей точкой полос нелинейных резонансов связи /на начальном этапе ускорения/ имеет оптимизация процесса инжекции с тем, чтобы получить пучок частиц на орбите ускорителя с минимальными амплитудами бетатронных колебаний. Наилучшие результаты по интенсивности ускоренного пучка были достигнуты экспериментально в режиме инжекции с модуляцией энергии инжектируемого пучка, когда максимальные значения γ -амплитуд существенно уменьшались. В настоящее время, после создания прецизионного программного устройства для модулятора энергии^{3/}, получен пучок в камере ускорителя с амплитудами свободных колебаний в процессе инжекции, не превосходящими 10 см, что является существенным моментом в получении интенсивных ускоренных пучков.

г/ Для повышения эффективности инжектора при ускорении ядерного пучка в начальной части резонатора ЛУ-20 установлена промежуточная перегородка^{4/} из меди /посередине пятой трубки дрейфа/. Напряжение на ускорительной трубке ФИ при ускорении ядерного пучка стало равно 630 кВ /вместо 300 кВ/. При этом интенсивность ускоренных пучков дейтронов и α -частиц на выходе ЛУ-20 /по сравнению с прежним режимом/ возросла соответственно в 3 и 5 раз.

В настоящее время в результате проведенных усовершенствований инжекционного комплекса на его выходе достигнуты следующие интенсивности ускоряемых пучков:

протонного - 50 мА / 10^{14} р/имп./,
 дейтронного - 10 мА / $2 \cdot 10^{13}$ д/имп./,
 α -частиц - 0,8 мА / $1,5 \cdot 10^{12}$ а /имп./.

д/ Уже в работе^{5/} было показано, что наличие азимутальных вариаций производных магнитного поля по

радиусу / $\frac{dB}{dr}$; $\frac{d^2B}{dr^2}$ и т.д./ является одной из основ-

ных причин потерь частиц в начале процесса ускорения за счет действия резонансов высокого порядка. Поэто-

му дальнейшая работа по повышению интенсивности была направлена, с одной стороны, на компенсацию с помощью систем коррекции азимутальных гармоник магнитного поля, и, с другой стороны, на устранение причин, порождающих эти гармоники^{6/}. "Расчистка" ведущего магнитного поля синхрофазотрона позволила получить в устойчивом эксплуатационном режиме интенсивности ускоренных пучков, которые приведены ниже. Ранее аналогичные результаты могли быть получены после длительной оптимизации режима инжекции и тщательной коррекции ведущего магнитного поля.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

а/ Протонный пучок

При исследовании влияния пространственного заряда на динамику частиц в процессе ускорения представлял наибольший интерес протонный пучок, величина которого после указанных выше усовершенствований инжекционного комплекса достигала 50 мА/имп., что при длительности импульса 600 мкс составляло свыше $1,0 \cdot 10^{14}$ р/имп. При этом число частиц в квазибетатронном режиме при модуляции энергии инжектируемого пучка составляло $3 \cdot 10^{13}$ р/имп. При захвате в режим ускорения $1 \cdot 10^{13}$ протонов часть частиц попадает в полосу действия параметрического резонанса $\nu_z = \frac{1}{2}$, что подтверждается измерением темпа роста потерь в процессе ускорения. Измерение интенсивности ускоренного пучка показало, что при захвате на уровне 10^{13} частиц темп роста потерь существенно возрастает за счет резкого выпадения частиц в первые 10-20 мс по вертикали. Тем не менее в результате улучшения характеристик магнитного поля ускорителя, настройки систем коррекций магнитного поля, а также введения режима инжекции с модуляцией энергии удалось получить интенсивность ускоренного пучка в устойчивом режиме на уровне / $4 \cdot 4,5 \cdot 10^{12}$ р/имп.

При хорошо настроенном ускорителе наблюдается небольшой разброс в интенсивности ускоренного пучка.

Этот разброс, по-видимому, связан с флуктуациями параметров инжектируемого пучка. В таблице приведены некоторые характерные циклы режима ускорения.

№ цикла интенсивность	1	2	3	4	5	6	7
$N_{3P}/\text{имп}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$1,25 \cdot 10^{13}$	$1,15 \cdot 10^{13}$	$1,15 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$1,25 \cdot 10^{13}$
$N_{20P}/\text{имп}$	$6 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^{12}$	$6,5 \cdot 10^{12}$	$6,3 \cdot 10^{12}$	$6,2 \cdot 10^{12}$	$6,25 \cdot 10^{12}$	$6,5 \cdot 10^{12}$
$N_{100P}/\text{имп}$	$4,3 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$	$4,6 \cdot 10^{12}$	$4,6 \cdot 10^{12}$	$4,7 \cdot 10^{12}$	$4,6 \cdot 10^{12}$	$4,6 \cdot 10^{12}$
$\frac{N_{100}}{N_3} \%$	36,0	37,5	37,0	40,0	41,0	42,0	37,0

Эксперименты с предельной интенсивностью протонного пучка проводились при максимальной энергии частиц $100 \text{ МэВ} / t \leq 100 \text{ мс}$, что связано с ограничениями, обусловленными радиационной обстановкой, существующими в настоящее время.

На рис. 1 показаны кривые роста интенсивности ускоренного пучка /1,2/ в зависимости от количества частиц в квазибетатронном режиме для различных этапов развития ускорительного комплекса синхрофазотрона ОИЯИ.

Кривая 1 соответствует интенсивности протонного пучка после запуска ЛУ-20. Видно, что предельная интенсивность в ускорителе в то время достигала величины $2,5 \cdot 10^{11} \text{ р/имп.}$ и практически не зависела от величины тока инжектируемого пучка /ток инъекции 10 мА /.

Кривая 2 соответствует интенсивности в ускорителе после введения прецизионной модуляции энергии инжектируемого пучка, увеличению тока инъекции до 50 мА в импульсе и работе системы коррекции магнитного поля.

Анализ экспериментальных данных показывает, что существуют значительные резервы в повышении интенсивности ускоренного пучка протонов как за счет увеличения тока инъекции, так и за счет увеличения коэф-

фициента захвата в режим ускорения, который в настоящее время мал и составляет величину $\approx 30-40\%$.

6/ Пучки дейтронов и α -частиц

После установки промежуточной стенки в начальной части резонатора линейного ускорителя, увеличившей

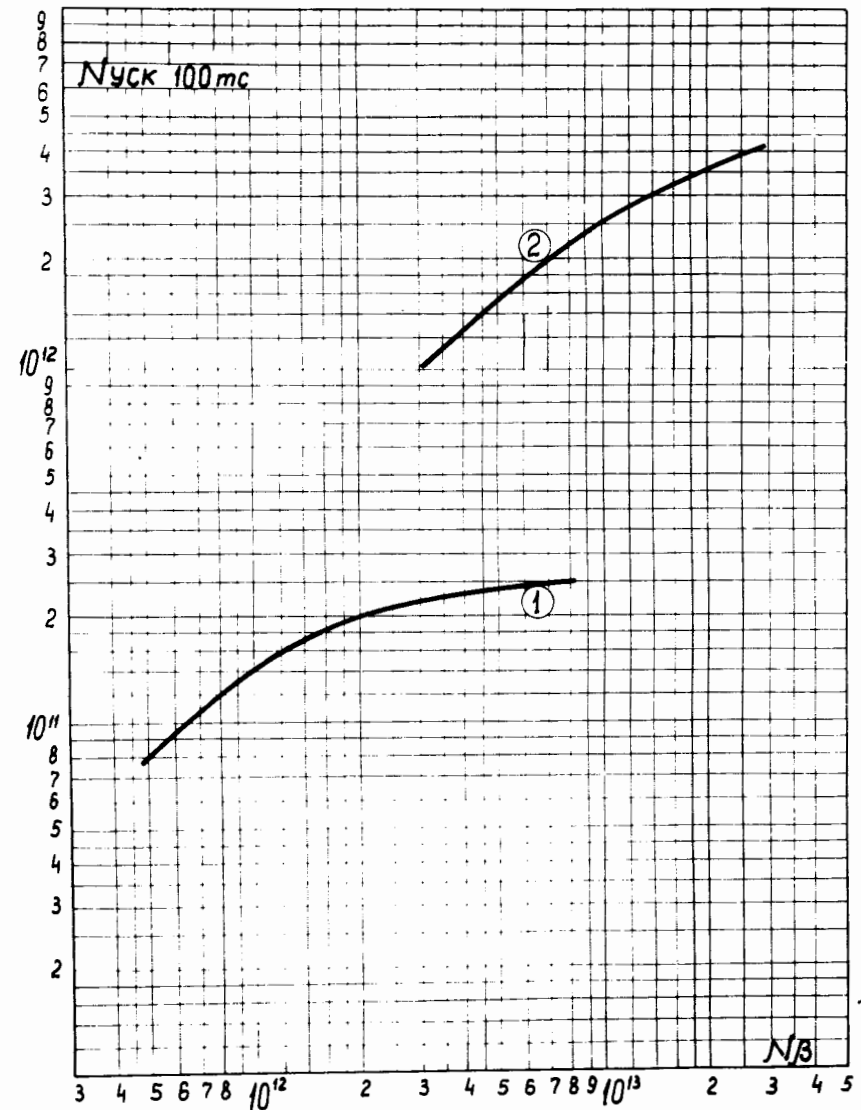


Рис. 1

ток инжектора, на первой кратности в синхрофазотроне получены следующие интенсивности частиц с энергией 4,7 ГэВ/нукл.:

интенсивность дейтронного пучка - $3 \cdot 10^{11}$ d/имп.,

интенсивность пучка α -частиц - $2 \cdot 10^{10}$ α /имп.

Дальнейшие перспективы увеличения интенсивности ускоренного пучка дейтронов и α -частиц связаны, в первую очередь, с увеличением тока этих частиц в импульсе на выходе инжектора ЛУ-20, что реально осуществимо в ближайшее время, а также с переходом на вторую гармонику во всем цикле ускорения при ускорении пучка в кольце синхрофазотрона. Ускорение ядерного пучка на первой гармонике, осуществленное на синхрофазотроне в 1974 г. после запуска инжектора ЛУ-20/7, имеет тот недостаток, что ввиду ограниченности динамического частотного диапазона радиотехнической системы ускоряющей станции азимутальный и радиальный размеры сепаратрисы малы и составляют соответственно 70-90° и 12-24 см. Эксперименты показали, что переход на вторую гармонику во всем цикле ускорения позволит увеличить интенсивность ускоренного пучка дейтронов и α -частиц в 2-3 раза. В настоящее время работы по созданию такой ускоряющей станции проводятся. Поэтому уже в ближайшее время возможно получение интенсивности дейтронного пучка 10^{12} d/имп. и пучка α -частиц - 10^{11} α /имп.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСКОРЕНИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ

Результаты экспериментальных исследований, приведенные выше, показывают, что многочисленные резонансы, появляющиеся при увеличении кулоновского сдвига /в том числе и резонансы связи 2-го и 3-го порядков - см.^{5/} /, не являются непреодолимыми и магнитное поле ускорителя можно считать удовлетворительным. Рассмотрим подробнее качественную картину, возникающую при числе захваченных в ускорение частиц $N_3 \approx 1,1 \cdot 10^{13}$. Примем модель сгустка в начале ускорения в виде "банана" эллипсоидального сечения с гауссовым

распределением плотности в r- и z-направлениях и степенной зависимостью от азимута /см. подробнее^{5/} /, т.е.

$$\rho(r, z, \phi) = \rho_0 \cdot e^{-\frac{(r-R)^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}} \cdot \left(1 - \frac{\phi^2}{\phi_0^2}\right)^{3/2}, \quad /1/$$

a, b близки к полуосям поперечного сечения сгустка, $2\phi_0$ - азимутальная протяженность сгустка.

Распределение плотности заряда вида /1/, как показывают измерения параметров сгустка, неплохо аппроксимирует реальное положение вещей. Если положить $\beta_0 = v_\phi/c = 0,2$, a = 30 см, b = 8 см, $\phi_0 = 100^\circ$, то при $N_3 = 1,1 \cdot 10^{13}$ расчет по методике, аналогичной использованной в^{5/}, дает эффективные безразмерные частоты некогерентных колебаний для центра сгустка /"рабочая точка"/:

$$\nu_r = 0,56, \quad \nu_z = 0,40, \quad /2/$$

в то время как на краях сгустка они близки к частотам без учета кулоновского поля:

$$\nu_r^0 = 0,64, \quad \nu_z^0 = 0,87. \quad /3/$$

Таким образом /см. диаграмму частот на рис. 2/, частицы вблизи центра сгустка сдвигаются по частотам колебаний до параметрического резонанса $\nu_z = \frac{1}{2}$ и даже переходят через его полосу. Если бы сгусток был заряжен равномерно, то все частицы имели бы один и тот же сдвиг, равный максимальному /2/. Тогда в процессе ускорения все частицы одновременно проходили бы последовательно серию резонансов, начиная с $\nu_z = \frac{1}{2}$, $\nu_r - \nu_z = 0$ и т.д. На самом деле ситуация сложнее и в то же время более благоприятна.

Максимальный сдвиг при наличии зависимости типа /1/ имеют частицы вблизи центра /с минимальными радиально-фазовыми колебаниями/. Остальные частицы сложным образом распределены по величине сдвига в зависимости от синхротронных радиально-фазовых и бетатронных колебаний.

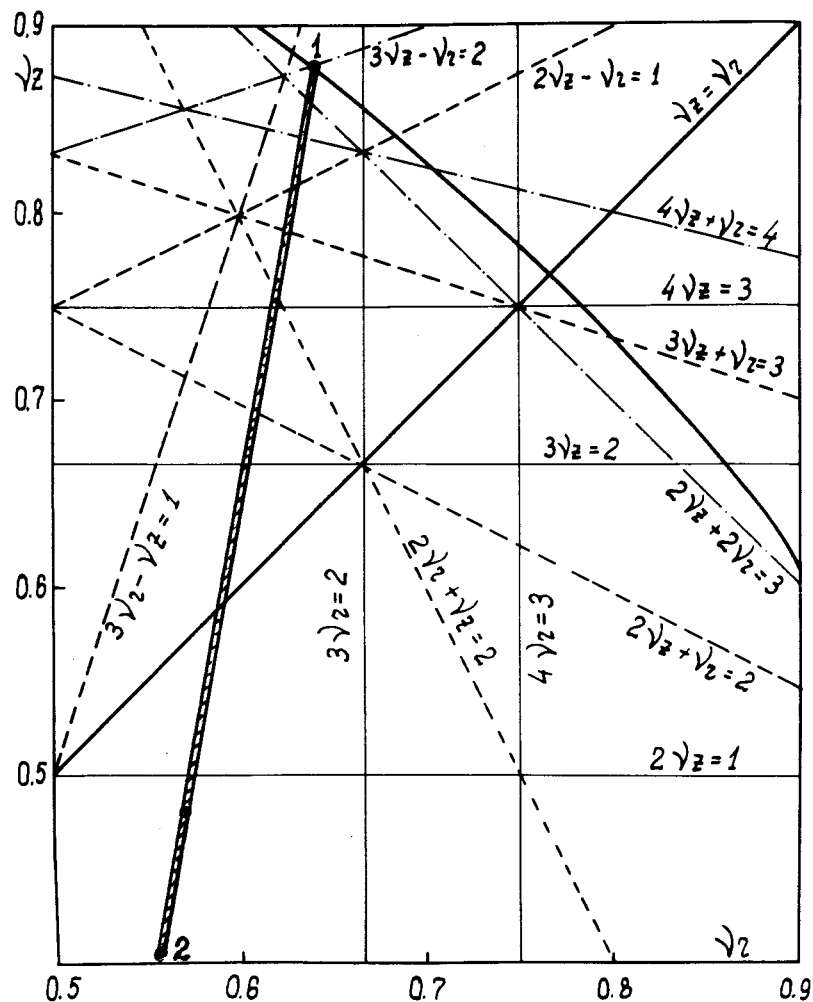


Рис. 2

При небольших отклонениях от центра ($\frac{r-R}{a}; \frac{z}{b} < \frac{1}{2}$)

и сильной эллиптичности поперечного сечения сгустка, как в данном случае, можно считать, что сдвиг ν_z^2 изменяется приближенно, как плотность частиц

$$\Delta \nu_z^2 \sim \rho(x, z, R\phi), \quad x = r - R.$$

Поскольку отклонения по z вызываются быстрыми бетатронными колебаниями, зависимость $\Delta \nu_z^2$ от z на самом деле усредняется по этим колебаниям с учетом изменяющейся по z плотности.

Для реальных параметров сгустка расчеты показывают, что сдвиг мало меняется при радиально-фазовых синхротронных колебаниях, поэтому приближенно, по порядку величины, можно оценить долю частиц в центральной части сгустка, сдвиг которых превышает заданную величину $\Delta \nu_z^2$, как число частиц в сгустке с распределением плотности, подобным основному /1/, размер которого по r равен

$$r/a = \sqrt{1 - \Delta \nu_z^2 / (\Delta \nu_z^2)_0}. \quad /4/$$

Если обозначить скорость изменения $(\Delta \nu_z)_0$ при ускорении через $\dot{\nu}_z$ /эта величина несколько зависит от величины сдвига и времени/, то время действия резонанса с шириной полосы P_z на данную частицу равно

$$\tau = \frac{P_z}{\dot{\nu}_z}, \quad /5/$$

а общее время действия данного резонанса /раскачки колебаний всей доли частиц сгустка/ равняется, очевидно,

$$\Delta T = \frac{\nu_z - \nu_z^p}{\dot{\nu}_z}. \quad /6/$$

Здесь ν_z^p - значение эффективной частоты с учетом кулоновского поля, соответствующее середине полосы рассматриваемого резонанса.

В экспериментах с захваченным в сепаратрису числом частиц $1,1 \cdot 10^{13}$ действие параметрического резонанса $\nu_z = 1/2$ распространяется примерно на 15% частиц сгустка. При этом время действия /усредненное по интервалу 100 мс/ будет определяться значением $\dot{\nu}_z$, которое для параметров синхрофазотрона составляет приближенно

$$\dot{\nu}_z \approx 2,5 \text{ 1/с}. \quad /7/$$

Тогда время действия параметрического резонанса /6/ равно 40 мс, но это значение вычислено без учета возможных потерь частиц. Если потери есть, скорость смещения рабочей точки, естественно, увеличивается.

Для выяснения того, как при этом изменяется амплитуда колебаний частиц, необходимо использовать данные о времени прохождения полосы резонанса /5/ и о характеристиках магнитного поля ускорителя, непосредственно определяющих ширину полосы и инкремент нарастания амплитуды.

Сделанные расчеты для резонанса $\nu_z = 1/2$ с использованием данных о величине $n(\theta)$ без учета коррекций показали, что при существующем состоянии магнитного поля рост амплитуды z -колебаний значителен /при $\tau = 2,5$ мс $a_z/a_{z0} \sim 2 \cdot 10^3$ / и частицы, подверженные действию параметрического резонанса, могут выпасть из режима ускорения.

Характерным для развиваемых представлений является то, что, во-первых, доля резонансных частиц увеличивается с ростом общего числа частиц и, во-вторых, число резонансных частиц в течение времени действия резонанса /6/ уменьшается по мере того, как рабочая точка $(\nu_z^2)_0$ приближается к его полосе.

Эксперимент не противоречит этим представлениям. Согласно рис. 3 при $N_3 = 1,1 \cdot 10^{13}$ /кривая 1/ темп потерь наиболее высок в начале процесса /до 20 мс/; далее, введение сеток /кривые 2,3, где ток инжекции ограничен одной и двумя сетками/, заметно снижает этот темп. Как видно из рис. 3, уменьшение числа захваченных частиц в 2 раза уменьшает долю потерянных частиц с 60% до 30%. Заметим, что в этом случае при формировании баланса потерь исключаются резонансы $\nu_z = 1/2$, $\nu_r - \nu_z = 0$, $3\nu_z = 2$.

В заключение рассмотрим вопрос о предельной интенсивности пучка синхрофазотрона. Проведенные эксперименты, а также физические соображения, развитые выше, дают основание полагать, что предельная интенсивность пучка ускорителя/не только синхрофазотрона/ может превышать т.н. предел по пространственному заряду /см. также результаты, полученные в рабо-

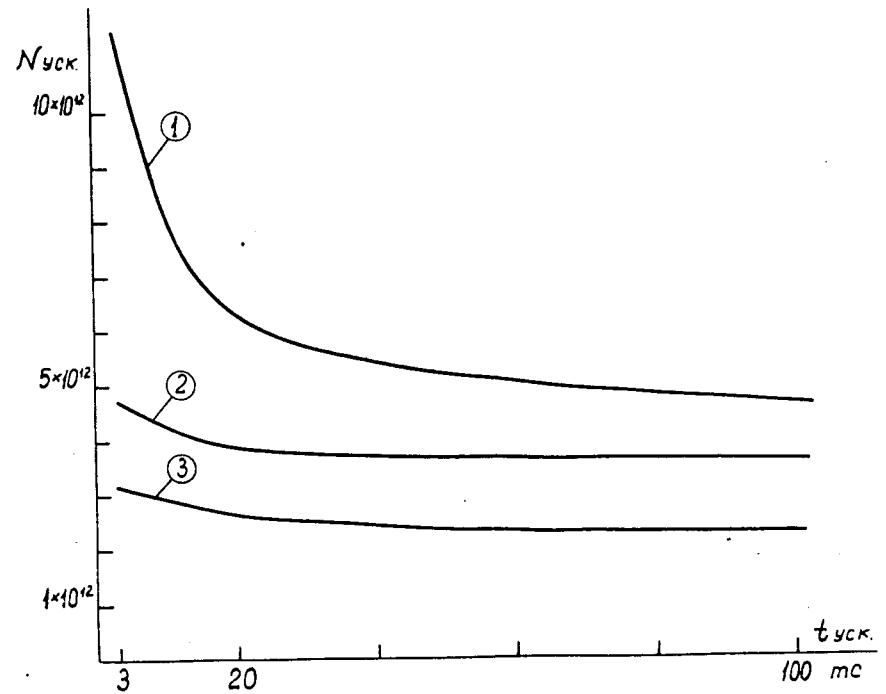


Рис. 3

те/8./ /. Последний, как известно, определяется, как число частиц в сгустке, при котором кулоновское поле сдвигает частоты колебаний до ближайшего параметрического резонанса. Насколько велико может быть это превышение, зависит от типа ускорителя и его технического состояния.

В условиях синхрофазотрона при захвате в сепаратрису более чем 10^{13} частиц сильно уменьшаются частоты колебаний, особенно ν_z . Аналогичный физический эффект проявляется и в квазибетатронном режиме при $N\beta \approx 2 + 3 \cdot 10^{13}$; увеличение амплитуд z -колебаний и соответствующего размера пучка по вертикали может ограничить максимальное значение $N\beta$. В существующих условиях, как показывают оценки и эксперимент, более существенным оказывается сдвиг частоты при формировании сгустка в процессе ускорения. При $N_3 = 1,5 \cdot 10^{13}$

частота z -колебаний вблизи центра сгустка вообще обращается в нуль. При хорошей коррекции $n(n(\theta)) \rightarrow \text{const}$ и возможном увеличении скорости прохождения параметрического резонанса /например, форсировкой магнитного поля на начальных 30 мс ускорения/ число ускоряемых частиц может все же превзойти кулоновский предел, который для синхрофазотрона при энергии инжекции 20 МэВ в нашей предыдущей работе^{/9/} был оценен, как равный примерно $7 \cdot 10^{12}$ р/имп. При числе захваченных частиц порядка $1,3 \cdot 10^{13}$ и выполнении указанных условий /а также соответствующих коррекций резонансов 3-го и 4-го порядков/ интенсивность ускорителя может достигать 10^{13} р/имп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В.А. ОИЯИ, 9-11835, Дубна, 1978.
2. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 9-11765, Дубна, 1978.
3. Безногих Ю.Д., Воеводин М.А., Сайфулин Ш.З. ОИЯИ, 9-11128, Дубна, 1977.
4. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 9-9592, Дубна, 1976.
5. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Р9-9115, Р9-9120, Дубна, 1975.
6. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, Б2-9-10141, Дубна, 1976.
7. Михайлов А.И. и др. ОИЯИ, 9-9901, Дубна, 1976.
8. Адо Ю.М. и др. Достижение интенсивности $5 \cdot 10^{12}$ протонов в импульсе на ускорителе ИФВЭ. В кн.: Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1978, с.202.
9. Безногих Ю.Д. и др. Повышение интенсивности ускоренного протонного пучка в синхрофазотроне ОИЯИ. Там же, с. 245.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 сентября 1978 года.