

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

В.Е. Балакин, В.А. Востриков, А.В. Кожемякин,
В.Ф. Куценко, С.А. Растигеев, Г.М. Тумайкин,
В.Ф. Туркин, Д.А. Хлыстов

ЭФФЕКТ «ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ МАССЫ»
НА ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ ТРАПШ

ИЯФ 2000-21

Новосибирск

2000

Эффект «отрицательной массы»

на протонном синхротроне ТРАПП

*В.Е.Балакин, В.А.Востриков, А.В.Кожмякин, В.Ф. Куценко,
С.А.Растигеев, Г.М.Тумаикин, В.Ф.Туркин, Д.А.Хлыстов*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования эффекта «отрицательной массы» на протонном синхротроне ТРАПП. Приводятся данные по аналитическим оценкам эффекта, численному моделированию и экспериментальному изучению. Получено хорошее совпадение теории и экспериментов на начальной стадии развития неустойчивости. Изучено влияние эффекта «отрицательной массы» на потери частиц.

The «negative mass» effect in the proton synchrotron TRAPP

*G.M.Tumaikin, V.E. Balakin, D.A. Khlystov, A.V. Kozhemyakin,
V.F. Koutsenko, S.A. Rastigeev, V.F. Turkin, V.A. Vostrikov*

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

In this paper we present the results of studying of the «negative mass» effect in the proton synchrotron TRAPP. The analytical estimations of the effect, numerical simulations and experimental observations were presented. The numerical simulations and the analytical estimations are in good agreement at initial stage of the instability evolution with the experimental data. The influence of the «negative mass» effect on the particles losses was studied.

© *Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера*

Введение

В процессе наладки протонного синхротрона ТРАПШ [1], предназначенного для терапии рака протонным пучком, была обнаружена продольная бунчировка впущенного пучка, возникающая уже после десятка оборотов от момента инжекции. Изучение этого явления показало, что оно обусловлено так называемым "эффектом отрицательной массы". Этот эффект, впервые обнаруженный около 40 лет назад [2,3], приводит к самопроизвольной группировке циркулирующего пучка. Природа этого эффекта следующая. Случайное увеличение продольной плотности пучка вызывает возникновение направленных вдоль сгустка сил, отталкивающих соседние частицы от области локального увеличения плотности. При этом у частиц, опережающих это увеличение плотности, энергия увеличивается, а у отстающих - уменьшается. В случае, когда частота обращения частиц ω уменьшается с увеличением энергии E , т.е. $d\omega/dE < 0$, эти соседние частицы циркулирующего пучка начинают двигаться в область увеличенной плотности, т.е. навстречу действующей силе. Отсюда и происходит термин "отрицательная масса". В результате вышеописанного процесса флуктуации плотности экспоненциально нарастают, и несгруппированный пучок быстро разбивается на отдельные сгустки. Результаты, полученные на протонном синхротроне, представляют определенный интерес, так как эффект "отрицательной массы" может приводить к увеличению энергетического разброса и к существенным потерям частиц.

1. Описание синхротрона ТРАПШ

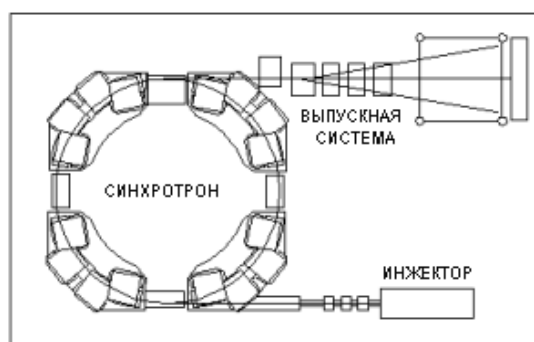


Рис. 1. Установка ТРАПШ для протонной терапии.

Протонный синхротрон ТРАПП (Рис.1) предназначен для ускорения протонов с целью их использования для терапии рака и томографического обследования. Магнитная система синхротрона образована восемью магнитами с однородным магнитным полем, разделенными четырьмя длинными и четырьмя короткими промежутками. Фокусировка по вертикали обеспечивается скошенными краями магнитов. Инжектором протонов служит выпрямитель на 700 кэВ с импульсным дуговым источником, инжекция однооборотная с использованием магнита Ламбертсона, расположенного в одном из длинных промежутков, и инфлектора, гасящего радиальные бетатронные колебания, расположенного в следующем длинном промежутке. В качестве ускоряющего устройства используется широкополосный одновитковый трансформатор. Работа ведется на первой гармонике частоты обращения от 0.9 до 16 МГц, ускоряющее напряжение до 150 В. Выпуск обеспечивается рассеянием на тонкой мишени с последующим отклонением электростатическим дефлектором. В таб.1 приведены основные параметры синхротрона ТРАПП.

Таблица 1. Основные параметры синхротрона ТРАПП

Максимальная энергия	320 МэВ
Энергия инжекции	0.7 МэВ
Периметр орбиты	1288.5 см
Число периодов магнитной структуры	4
Структура периода	$L/2 B Ls B L/2$
Длина промежутков L, Ls	76.5, 10 см
Угол поворота магнита	45°
Краевые углы магнитов	
длинный промежуток	13.8°
короткий промежуток	11.25°
Магнитный радиус	150 см
Средний радиус	205 см
Бетатронные частоты ν_r, ν_z	0.915, 0.768
Коэффициент расширения орбит	1.74
Поле при инжекции	800 Гс
Максимальное поле	18 кГс
Вертикальная апертура	1.5 см
Радиальная апертура	4.5 см
Коэффициент автофазировки при инжекции	497
Время оборота при инжекции	1,12 мксек

2. Аналитические оценки

2.1. Условия бунчировки пучка

Необходимым условием проявления эффекта ‘‘отрицательной массы’’ является такая зависимость частоты обращения пучка – ω от его энергии E , при которой $\partial\omega / \partial E < 0$. При малом энергетическом разбросе данный эффект приводит к разбесию пучка на сгустки с локальной плотностью существенно превышающей среднюю. Аналитические оценки в линейном приближении показывают, что достаточным условием бунчировки можно считать следующее условие на энергетический разброс в сечении пучка [2]:

$$\frac{dE}{E} < \sqrt{\frac{2 \cdot r_0 \cdot \Lambda \cdot N}{\pi \cdot R \cdot K \cdot \gamma^3}} = \left(\frac{dE}{E}\right)_{\text{КРИТ}} , \quad (1)$$

где dE – энергетический разброс в сечении пучка, E – полная энергия частицы, r_0 – классический радиус частицы, R – средний радиус ускорителя, K – коэф. автофазировки, N – полное число частиц, Λ – фактор, определяемый геометрией пучка и вакуумной камерой ускорителя.

В случае прямоугольной вакуумной камеры можно считать [3], что:

$$\Lambda = 1 + 2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{\pi \cdot \rho}\right) , \quad (2)$$

где ρ – радиус пучка, h – вертикальная апертура камеры. Критерий неустойчивости (1) не зависит от азимутальной длины неоднородности плотности пучка [4], т.е. при энергетическом разбросе меньше критического могут образовываться сгустки любой длины.

Подставим в выражения (1) и (2) параметры синхротрона ТРАПП: $R = 205\text{см}$, $h = 1.5\text{ см}$, $K = 497$, $E_{\text{кин}} = 0.7\text{ МэВ}$, $r_0 = 1.54 \cdot 10^{-16}\text{см}$, где $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия протонов. Получим: $\Lambda = 2.3$. Для $N = 10^9$ частиц, имеем :

$$\left(\frac{dE}{E_{\text{кин}}}\right)_{\text{крит}} = \left(\frac{dE}{E}\right)_{\text{крит}} \cdot \frac{E}{E_{\text{кин}}} = 2 \cdot 10^{-3}$$

Для оценки времени развития неустойчивости, будем рассматривать азимутальное возмущение плотности пучка, как q ую гармонику периметра ускорителя. В длинноволновом приближении время роста неоднородности в e раз можно получить из формулы [2]:

$$T = 2 \cdot \left(q \cdot K \cdot \omega \cdot \sqrt{\left(\frac{dE}{E}_{\text{крит}} \right)^2 - \left(\frac{dE}{E} \right)^2} \right)^{-1} . \quad (3)$$

Будем считать, что $\frac{dE}{E} \ll \left(\frac{dE}{E} \right)_{\text{крит}}$, тогда время развития неустойчивости выраженное в числе оборотов частиц есть

$$T_1 = [q \cdot K \cdot \pi \cdot \left(\frac{dE}{E} \right)_{\text{крит}}]^{-1} . \quad (4)$$

Для параметров ТРАПП если $N=10^9$ частиц, то $T_1=430/q$ оборотов.

2.2. Параметры устойчивого во времени сгустка

В результате бунчировки пучка образуются сгустки, часть из которых принимает устойчивый во времени вид. Согласно [5] азимутальное распределение плотности пучка, разбившегося на q одинаковых сгустков, можно записать следующим образом:

$$\xi = \xi_0 \cdot (1 - \cos(q \cdot \theta)) ,$$

где $\xi_0 = N \cdot e / (2 \cdot \pi \cdot R)$, θ – азимутальный угол.

Потенциал пучка равен:

$$U = U_0 \cdot (1 - \cos(q \cdot \theta)) , \text{ где } U_0 = \xi_0 \cdot \Lambda . \quad (5)$$

Подставив в (5) параметры ТРАПП, получим, что для частиц $N=10^9$ – $U_0=0.26$ В. Под воздействием градиента U , частицы в таких сгустках движутся в области ограниченной сепаратрисой, аналогично движению в ускоряющем высокочастотном поле. За один оборот частицы набирают энергию:

$$dE_{\text{об}} = 2 \cdot \pi \cdot q \cdot e \cdot U_0 \cdot \sin(q \cdot \theta) / \gamma^2 . \quad (6)$$

Частота малых радиально-фазовых колебаний в сгустке равна

$$\Omega = \omega \cdot \sqrt{\frac{q \cdot K \cdot dE_{\text{об}}}{2 \cdot \pi \cdot E}} , \quad (7)$$

Подставив (5) и (6) в (7), получим период малых радиально-фазовых колебаний: $T_2 = 2 \cdot \pi \cdot T_1$, где T_1 – время развития неустойчивости, определенное в (4). Аналогично можно получить, что максимальный энергетический разброс в устойчивом сгустке равен

$$\left(\frac{dE}{E}\right)_{max} = \left(\frac{dE}{E}\right)_{крит} . \quad (8)$$

3. Численное моделирование

3.1. Описание программы

Для моделирования коллективных эффектов в ТРАППе была написана трёхмерная программа в основе, которой лежат зарекомендовавшие себя методы частица-сетка и частица-частица [6,7]. Пучок описывается совокупностью равномерно заряженных сферических макрочастиц (характерный размер $R = 0.5\text{см}$), взаимодействующих между собой. Количество макрочастиц достигало, при приемлемых затратах машинного времени, значения до 10^6 .

Движение частиц во внешних полях структуры ускорителя моделируется в линейном приближении матричным методом. При этом в динамической памяти сохраняется набор 6-мерных векторов состояния частиц, что позволяет наблюдать как за изменением 6-мерного фазового объёма пучка, так и за динамикой любых маркированных макрочастиц.

Изменение импульса макрочастицы, за счёт сил пространственного заряда, вычисляется несколько раз за время одного оборота, причём временной шаг должен уменьшаться с увеличением общего заряда пучка. Так, при интенсивности 10^9 частиц на кольцо временной шаг составляет

$\tau = \frac{1}{132} T_0$, где T_0 – период обращения. Алгоритм вычисления сил пространственного заряда методом частица-сетка следующий:

1. В области занятой пучком вводится равномерная сетка с шагом $\lambda = 1\text{мм}$.
2. Вычисляется плотность заряда в сеточных узлах ρ_j по схеме CIC (cloud in cell).
3. Методом функции Грина вычисляются значения потенциала в сеточных узлах, $G(r_i, r_j)$, $\varphi(r_i) = \sum_j G(r_i, r_j) \rho_j$, где – функция Грина заряженной макрочастицы, расположенной в j-ом узле. При этом учитываются только те частицы, для которых выполняется условие: $|r_j - r_i| < R$, где R – радиус экранировки. В нашем случае $R = 5\text{см}$.

Значения функции Грина табулируются заранее и сохраняются в RAM.

4. В сеточных узлах вычисляется значение сил F_i^α , где $\alpha = x, y, z$, и интерполируются силы действующие на макрочастицы.

Далее цикл повторяется.

Программа написана с использованием языка C⁺⁺.

3.2. Результаты моделирования

Моделирование проводилось для начальных условий близких к условиям инжектируемого в синхротрон пучка. Выбиралась длина сгустка, форма продольного распределения, число частиц, энергетический разброс. Последний, в простом случае, может быть представлен в двух вариантах, как это может иметь место в реальном пучке. Первый вариант - энергетический разброс постоянный и не зависит от продольной координаты пучка. Вторым вариантом – энергетический разброс в сечении пучка отсутствует, но средняя энергия пучка меняется от времени, т.е. имеет место модуляция по энергии. Очевидно, в реальном случае картина фазовой плоскости в пространстве импульс-продольная координата может быть весьма сложной, но мы в моделировании для начальных условий исследовали только два простых случая: постоянный энергетический разброс и временная модуляция энергии. Последняя обычно задавалась в форме линейного изменения энергии от головы до хвоста сгустка.

Результат моделирования обычно представлялся в виде зависимости плотности частиц от продольной координаты (представленной в терминах доли оборота), что легко наблюдать в реальном эксперименте. Кроме того, для представления процесса полезно было выводить распределение частиц на фазовой плоскости.

Ниже представлены результаты моделирования. На Рис.2 показано, как ведет себя замкнутый несбунчированный пучок. В продольное распределение пучка вводится "затравочная" неоднородность продольной плотности: локальные уменьшение и увеличение плотности величиной 12 процентов. Видно, что если энергетический разброс в сечении пучка ниже критического (Рис.2.б), то возмущения начинают быстро нарастать, изменяя распределение частиц вблизи первоначальной неоднородности плотности. Появляются новые возмущения плотности, группирующие уже более отдаленные по азимуту частицы. Величина модуляции плотности может достигать 100%. Если энергетический разброс в сечении пучка выше крити

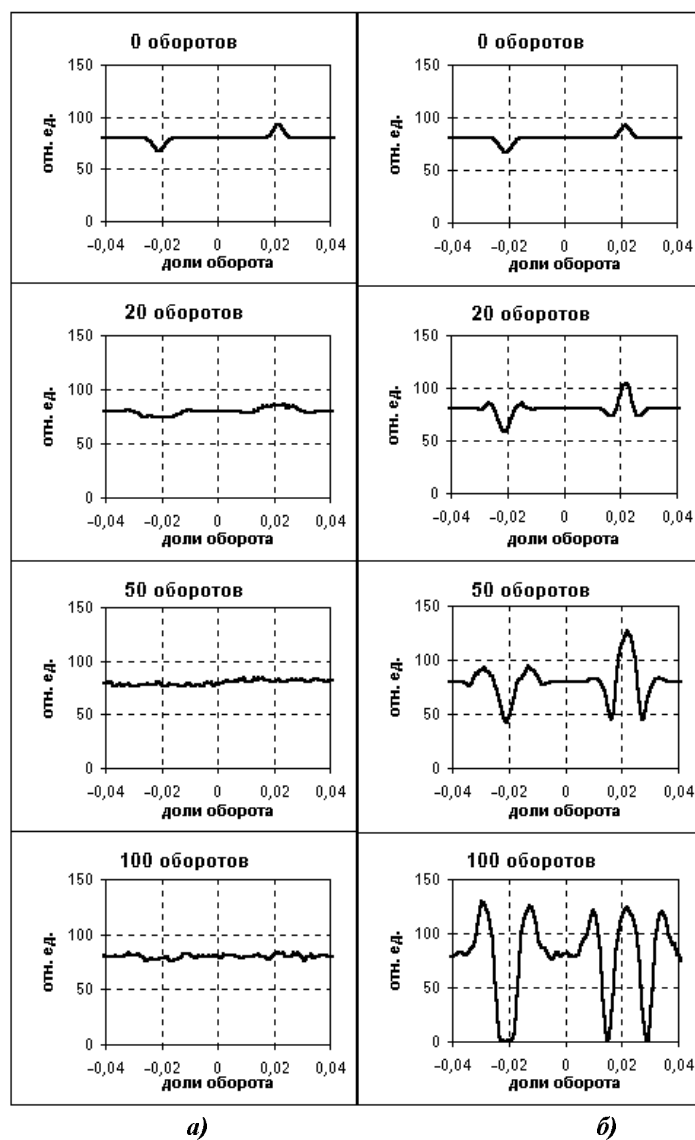


Рис. 2. Развитие продольного распределения частиц, для различных значений энергетического разброса.
 а) $dE/E_{кин} = 1.2 \cdot 10^{-3}$, б) $dE/E_{кин} = 0.6 \cdot 10^{-3}$, $(dE/E_{кин})_{крит} = 0.9 \cdot 10^{-3}$.

ческого (Рис.2.а), то группировка частиц не происходит. Заданное возмущение плотности постепенно рассасывается, не вызывая существенного увеличения локальной плотности.

Для сравнения с теоретическими оценками введем возмущение плотности в виде синусоиды заданной гармоники ($q=100$) с амплитудой 3%. Из последовательности кадров (рис.3) можно определить инкремент нарастания возмущения. Полученная таким образом величина инкремента, измеренная в числе оборотов, при котором величина возмущения возрастает в e раз, составляет 3.8 оборота. Из расчета по формуле (4) для тех же параметров величина инкремента равна 4.3 оборота.

Видно хорошее согласие между результатами моделирования и предсказаниями теории.

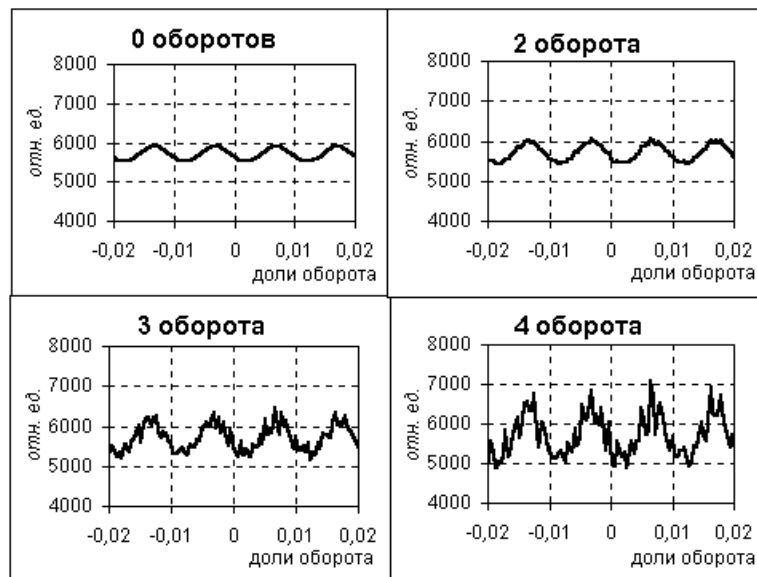


Рис. 3. Развитие неустойчивости на 100-ой гармонике.
Число частиц – 10^9 .

Интересно проверить влияние модуляции энергии. На рис.4 приводятся два фрагмента перегруппировки частиц (через 50 и 70 оборотов от инжекции) с изначально внесенной синусоидальной модуляцией

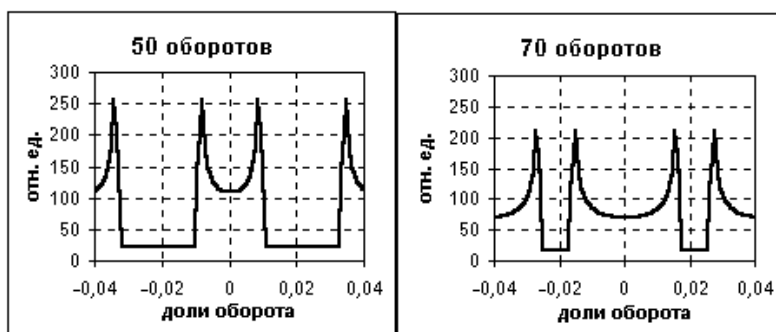


Рис. 4. Перегруппировка частиц с изначально внесенной синусоидальной модуляцией энергии вдоль азимута. Без учета взаимодействия между частицами.

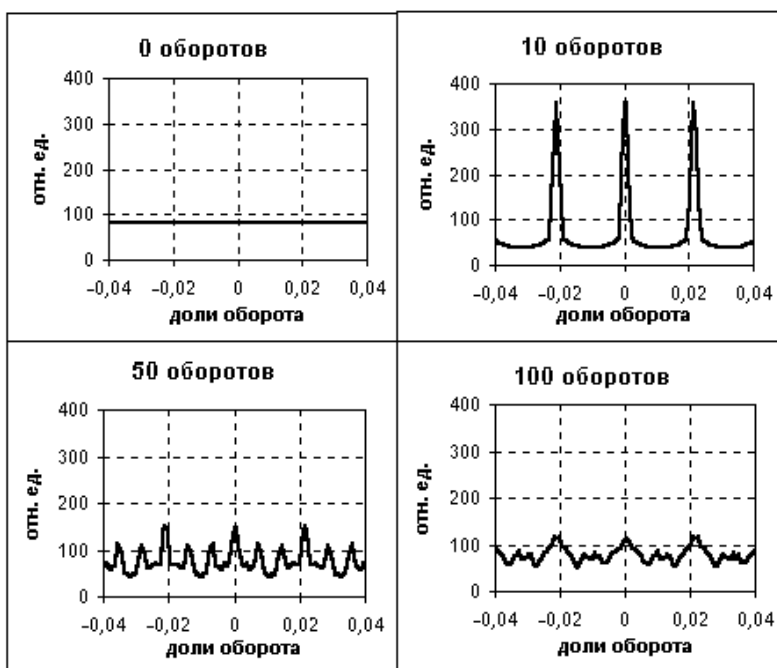
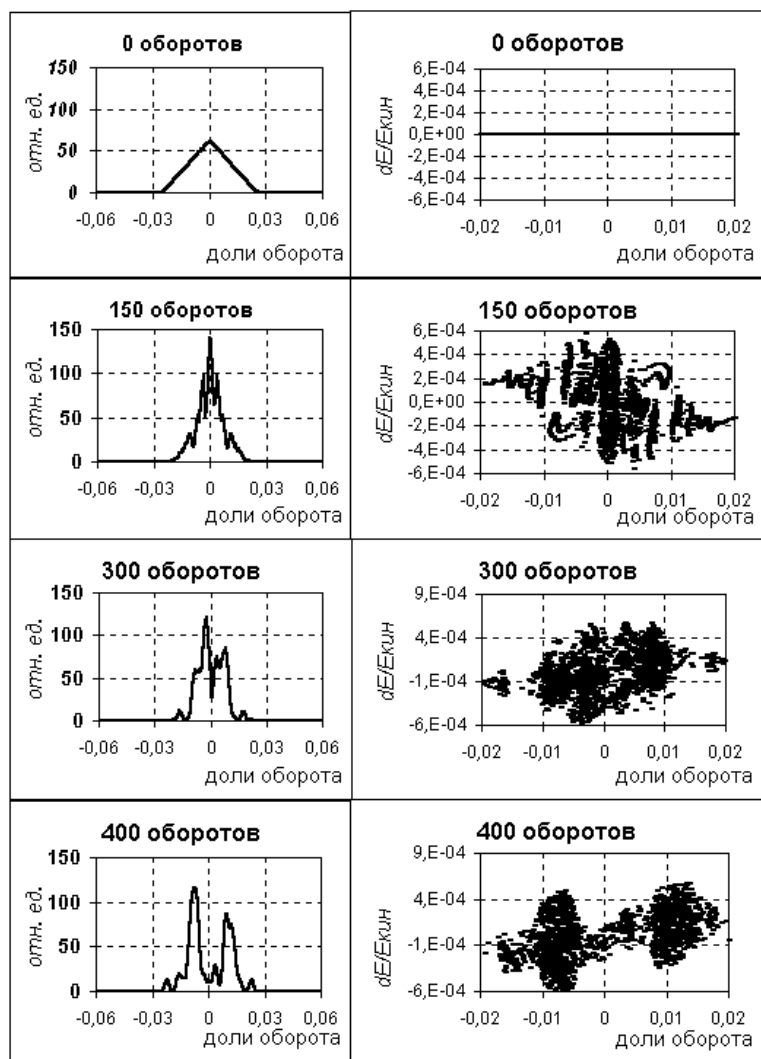


Рис. 5. Перегруппировка частиц с изначально внесенной синусоидальной модуляцией энергии вдоль азимута. Число частиц $2 \cdot 10^8$. $dE/E_{кин} = 10^{-3}$.

энергии вдоль азимута, без учета взаимодействия между частицами. На вершинах синусоиды градиент энергетического разброса мал, поэтому распыление частиц в данных азимутальных областях происходит медленно. В результате образуются сгустки. Изменение в распределении частиц с учетом пространственного заряда приведено на рис.5. Модуляция по энергии вызывает на начальном этапе образование интенсивных сгустков, которые постепенно распыляются. Взаимодействие между частицами приводит к убыстрению процесса рассасывания сгустков. Таким образом, с помощью модуляции энергии эффект отрицательной массы подавляется, но этот процесс на переходном этапе сопровождается образованием интенсивных сгустков, что может вызывать потери частиц. Подавление группировки частиц внесением энергетического разброса в сечении пучка более предпочтительно, т.к. не вызывает больших неоднородностей в плотности пучка.

Далее перейдем от замкнутого пучка к сгустку конечной длины. В установке ТРАПП используется однооборотная инжекция протонов. Из-за конечных фронта импульса инфлектора и времени установления поля максимальная длина пучка составляет около 0.9 периметра ускорителя. Очевидно, что на переднем и заднем фронтах возникает продольное электрическое поле, вызывающее сильную бунчировку пучка. Напряженность этого поля при типичных параметрах пучка: ($n=10^7$ частиц/см) и длине фронта 30 см составляет 22 мВ/см, что сравнимо с эффективно средней по периметру напряженностью ускоряющего напряжения 15.5 мВ/см. Следует также отметить еще одну особенность инжектируемого пучка. Это зависимость энергии от продольной координаты, обусловленная пульсациями напряжения инжектора. Период этих пульсаций равен 20 мксек, что сравнимо с длительностью инжектируемого пучка. Изменяя время привязки к фазе пульсаций, можно создавать зависимость энергии вдоль продольной координаты сгустка. Очевидно, что это вызывает укорочение или удлинение сгустка со временем в зависимости от знака энергетической зависимости независимо от сил пространственного заряда, что, естественно, влияет на развитие неустойчивости.

Ниже на рис.6 – рис.8 приведены графики моделирования динамики частиц в сгустке конечной длины. Рассмотрим динамику короткого монохроматического сгустка без плоской части (рис.6). Распределение частиц в сгустке меняется во времени. Вначале мы видим его укорочение и, соответственно, увеличение плотности в центре, сопровождаемое появлением энергетического разброса (рис.6.б). Затем сгусток расщепляется, причем



а) б)

Рис. 6. Динамика короткого монохроматического сгустка.
 Число частиц в сгустке 10^7 :
 а) динамика продольной плоскости;
 б) динамика фазовой плоскости.

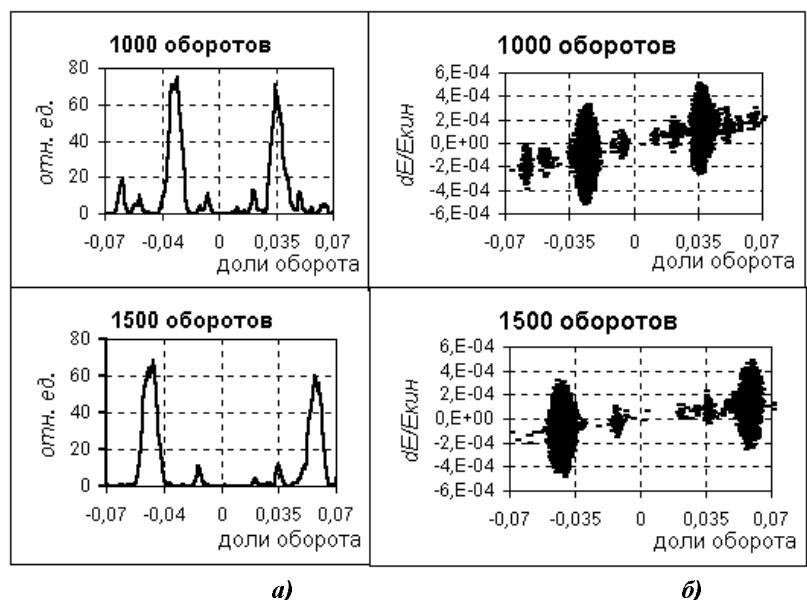


Рис. 6. (продолжение).

частицы из головы и хвоста меняются местами, и сгустки постепенно удаляются друг от друга. Средние энергии образовавшихся сгустков отличаются на величину $2 \cdot 10^{-4}$. На рис.6 приводится дальнейшее движение образовавшихся сгустков, неподверженных существенному распаду. На рис.7 детально изображен правый сгусток из рис.6.

Параметры данного ансамбля частиц:

- количество частиц – $4.3 \cdot 10^6$ частиц;
- азимутальная длина – 20 см;
- наибольшее отклонение по энергии – $4 \cdot 10^{-4}$.

Из выражения (8) получим, что наибольшее отклонение по энергии $3.3 \cdot 10^{-4}$.

На рис.8 демонстрируется, как меняется координата протона, находившегося в начале моделирования на заднем фронте сгустка (рис.6). Как видно из последовательности кадров протон совершает колебания относительно центра сгустка, которые напоминают синхротронные колебания внутри сепаратрисы, с периодом 300 оборотов. Из выражения (7) несложно получить, что период малых азимутальных колебаний частиц в сгустке (рис.8) равен: $T_2 = 252$ оборота, что сравнимо с результатами моделирования.

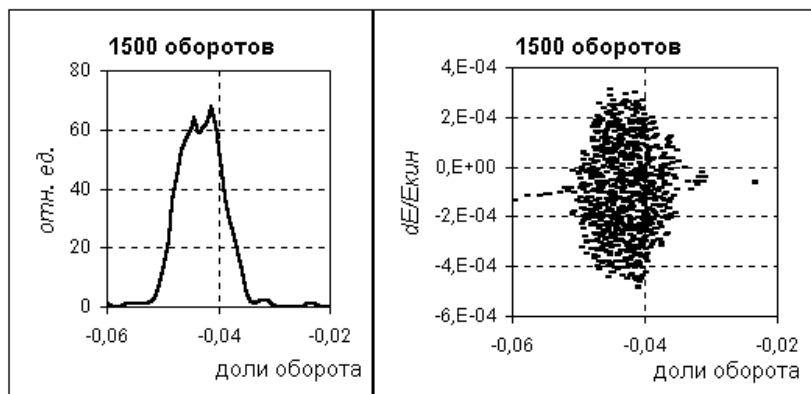


Рис. 7. Левый сгусток из рис. 6.

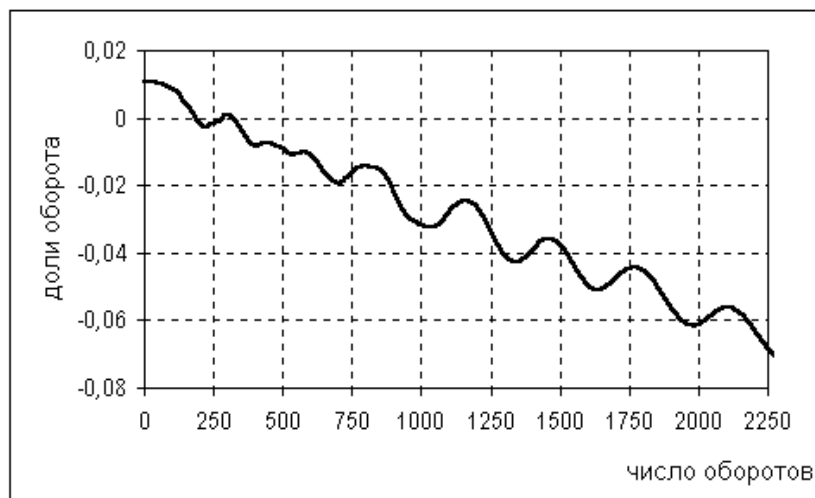


Рис. 8. Движение тестовой частицы в сгустке (рис. 6 - 7).
Общий наклон соответствует движению сгустка, как целого.

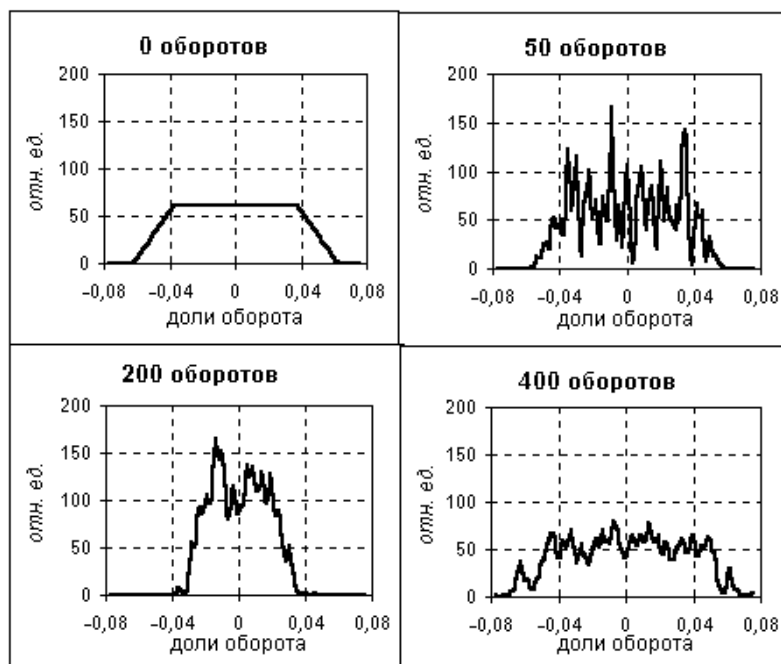


Рис. 9. Движение частиц при включении ВЧ напряжения.
 $U_{вч}=10 В$, число частиц $2 \cdot 10^8$.

И, наконец, рассмотрим реальную ситуацию проявления эффекта отрицательной массы при включении ускоряющего напряжения. Известно, как выглядит и преобразуется область, занятая пучком на фазовой плоскости синхротронного движения. Сразу после инжекции пучок с нулевым энергетическим разбросом и, соответственно, с нулевым фазовым объемом подвергается фазирующему действию ускоряющего напряжения, разворачивающему пучок на фазовой плоскости. Однако при реальных параметрах синхротрона ТРАПП бунчировка за счет эффекта отрицательной массы идет быстрее, чем за счет ускоряющего напряжения (рис.9). На кадрах видно, как сгустки, сформировавшиеся из-за эффекта отрицательной массы, "наползают" друг на друга под действием ускоряющего напряжения. Следует отметить, что из-за эффекта отрицательной массы "размешивание" протонов внутри сепаратрисы идет быстрее.

4. Эксперимент

Для наблюдения за пучком использовались сигналы с двух разных датчиков: с токового трансформатора и электростатического пикап-электрода. Цилиндрический электростатический электрод с эффективной длиной 1 см. Частота среза системы измерения составляет 100 МГц. Сигнал с электрода оцифровывался осциллографом с временной дискретностью 1 нс, позволяющий запоминать за один цикл инжекции один профиль пучка. Частота среза токового датчика – 25 МГц. Сигнал с токового датчика оцифровывался осциллографом с временной дискретностью 10 нс, позволяющий запоминать за один цикл инжекции четыре профиля пучка. В обеих системах измерения привязаны к моменту инжекции частиц в кольцо ускорителя, с регулируемым временем задержки, задаваемым в ГВИ. Абсолютное измерение числа захваченных или ускоренных протонов производилось по интегрированному сигналу с токового трансформатора при быстром сбросе пучка. В этом случае достаточно измерять амплитуду этого сигнала.

На рис.10 приведена форма сигнала, характеризующая распределение продольной плотности протонов в захваченном сгустке на шестом обороте. Видно, что имеется исходная модуляция продольной плотности. По нашим представлениям эта модуляция обусловлена нестационарными процессами в ионном источнике и неоднородностью импульса инфлектора, влияющей на эффективность захвата в разные моменты времени. На последующих кадрах рис.10 приведены формы наблюдаемого сигнала с электростатического пикап-электрода через определенное число оборотов с момента инжекции. К сожалению, приводятся кадры из разных циклов ускорения. Здесь следует отметить, что хотя общая картина в разных циклах повторяется, неустойчивость в каждом цикле развивается несколько по-разному. На 8 кадрах представлен типичный сценарий развития неустойчивости. Видно, что после 6-го оборота появляются еле заметные признаки модуляции продольной плотности, на 10-ом обороте модуляция достигает 10%, к 50-му – 50% и, наконец, к 500-му приближается к 80%. Разбиение пучка на сгустки близко к равномерному, количество сгустков около 60, что соответствует примерно 80-ой гармонике частоты обращения. Амплитуды сгустков отличаются не более, чем в два раза. Однако после нескольких сот оборотов разница амплитуд сгустков начинает увеличиваться, а количество сгустков уменьшаться. К 2000-му обороту остается около 10 сгустков, а после 10 тысяч – всего несколько. Естественно,

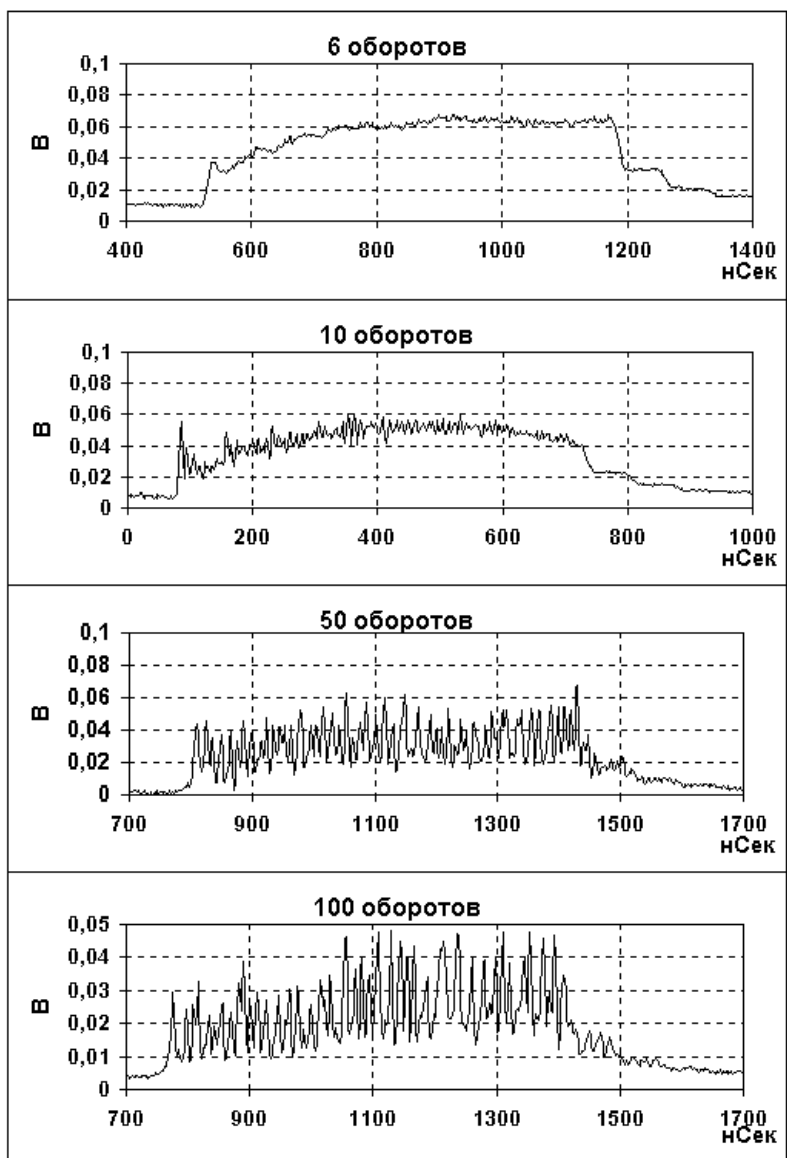


Рис. 10. Эксперимент. Продольный профиль пучка.

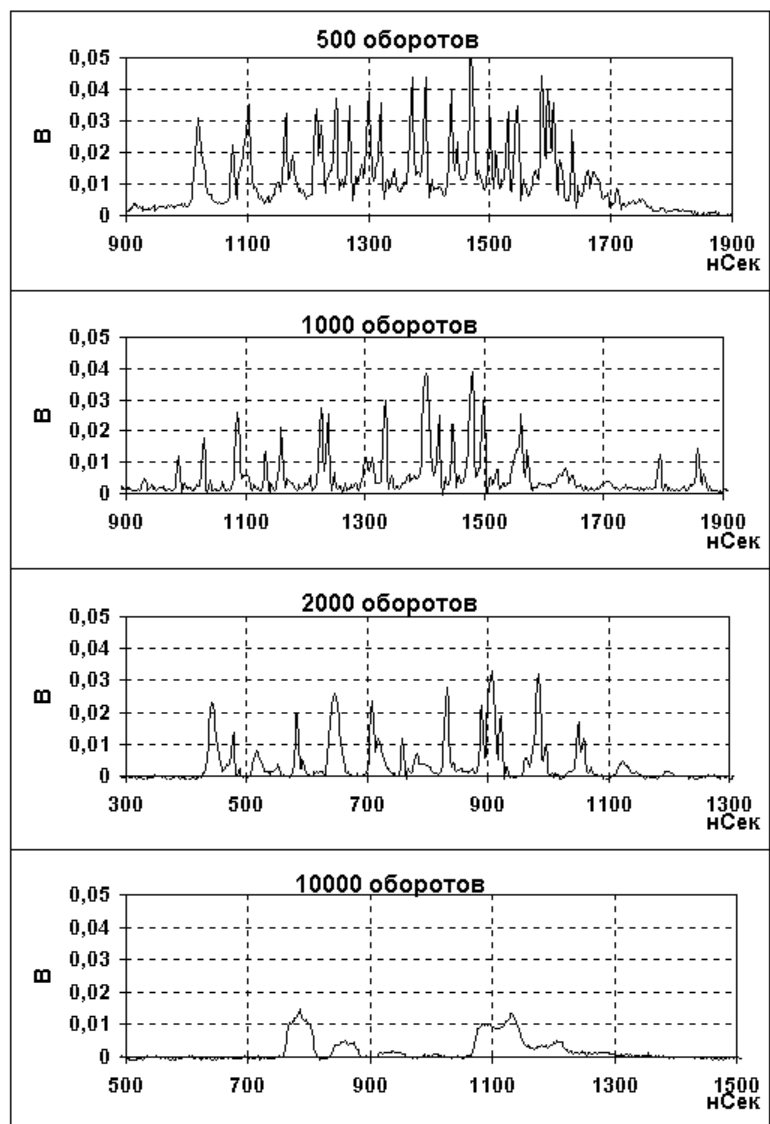
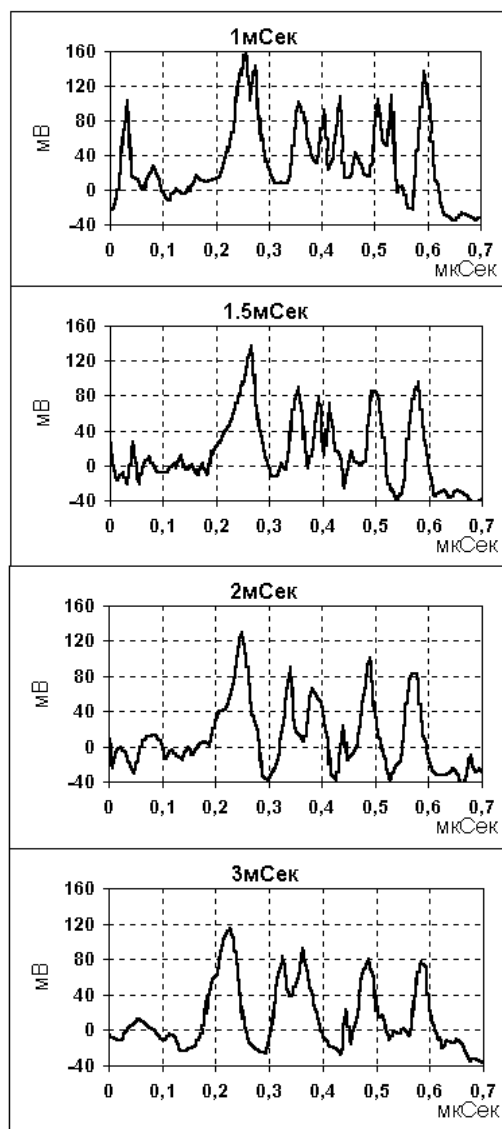


Рис. 10. Эксперимент. (продолжение).



*Рис. 11. Развитие продольной неустойчивости.
(кадры сняты в одном цикле инжекции).*

что все это происходит в условиях уменьшения интенсивности, которая, как видно из рис.10, уменьшается за это время примерно в 10 раз. Однако при уменьшении общей интенсивности число частиц в сгустке меняется незначительно. Из последовательности подобных кадров, как и при численном моделировании можно вычислить инкремент развития неустойчивости. Из кадров рис.10 соответствующих шестому и десятому оборотам видно, что за 4 оборота амплитуда неоднородности на 100-ой гармонике увеличивается примерно в 3 раза. Таким образом, время развития неустойчивости менее 4 оборотов. Для средней интенсивности сгустка $2.5 \cdot 10^9$ из выражения (4) получим, что время развития неоднородности на 100-ой гармонике равно 1.9 оборота.

Приведенные аналитические оценки и численное моделирование не могут полностью объяснить результат эксперимента, т.к. группировка пучка сопровождается потерями частиц.

Естественно возникает вопрос: каким образом уменьшается число сгустков и возрастает отличие в их интенсивности? Это может происходить двумя путями:

- 1) за счет слияния сгустков или перетекания частиц из одних сгустков в другие,
- 2) либо, за счет неравномерности потерь частиц из разных сгустков.

Имеющаяся аппаратура позволяла наблюдать в одном цикле четыре разных кадра, отстоящих друг от друга на задаваемое число оборотов. Из таких наблюдений (рис.11) можно сделать вывод, что уменьшение числа сгустков происходит за счет их слияния. Можно предположить, что этот процесс, развивающийся существенно медленнее, чем начальная группировка за счет отрицательной массы, обусловлен другими коллективными явлениями.

Важным доказательством, что наблюдаемая бунчировка обусловлена эффектом отрицательной массы, являются результаты двух экспериментов. В первом эксперименте в инжектируемый пучок вносился энергетический разброс. Для этого в инжекционный канал на пути пучка была установлена тонкая пленка из лавсана толщиной 0.3 – 0.5 микрометров. За счет неоднородности толщины пленки протоны имели разную величину ионизационных потерь, что приводило к разбросу энергии около 0.5%. Как видно из серии кадров (рис.12), эффекта отрицательной массы при этом не наблюдалось, а бунчированный сгусток постепенно расплывался на весь периметр кольца.

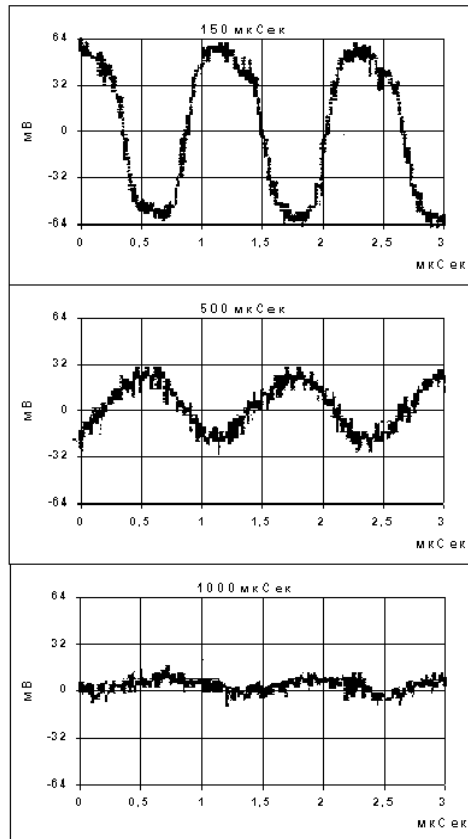


Рис. 12. Развитие продольного профиля пучка с внесенным пленкой энергетическим разбросом.

Другой эксперимент основан на перестройке оптики синхротрона с целью изменения знака dw/dE , т.е. обеспечить переход к "положительной" массе. Для перестройки структуры была использована корректирующая линза длинного промежутка. С помощью этой линзы был увеличен коэффициент пространственного уплотнения орбит с 1.7 до 0.9. При этом нарушалась симметрия оптики синхротрона, и уменьшался акцептанс (рис.13). Тем не менее, захваченный ток уменьшался только в 1.5 раза. Эффекта отрицательной массы в этом эксперименте также не наблюдалось (рис.14).

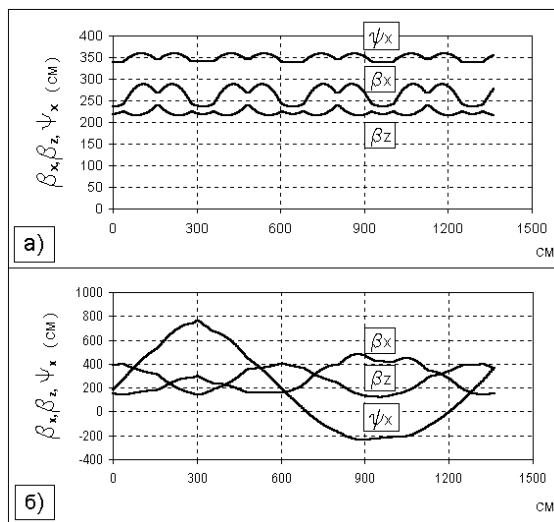


Рис. 13. а) Исходная структура, для $\alpha = 1.7$.
 б) Возмущенная структура, для $\alpha = 0.9$.

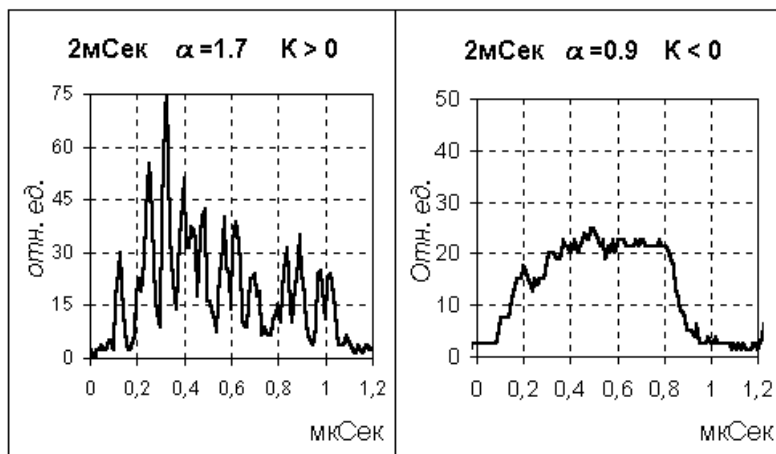


Рис. 14. Эксперимент. Продольный профиль пучка для разных значений коэффициента расширения орбит.

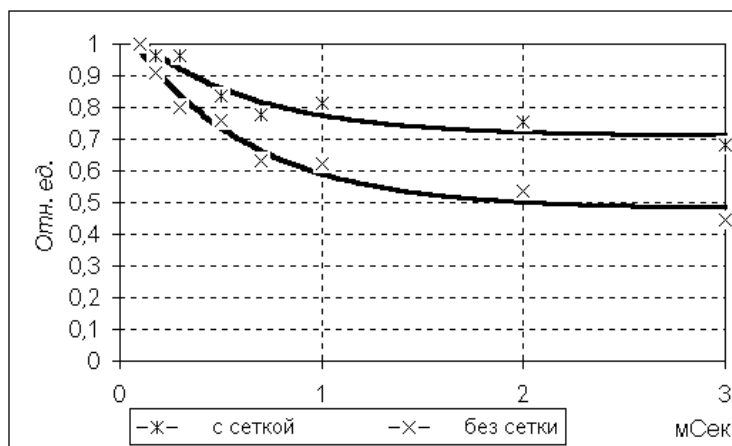


Рис. 15. Изменение интенсивности пучка во времени.

Возникает еще один вопрос: влияет ли эффект отрицательной массы на характер потерь частиц? Это можно сделать из измерений количества циркулирующих частиц в зависимости от времени для разных условий эксперимента. На рис.15 – 17 представлены результаты таких измерений. На рис.15 показана зависимость относительного числа протонов от времени при двух разных начальных интенсивностях, отличающихся примерно в тридцать раз.

В этом эксперименте исходная магнитная структура и отсутствует энергетический разброс, неустойчивость отрицательной массы развивалась в обоих случаях. Следует отметить, что при энергии инжекции основной механизм потерь обусловлен рассеянием на атомах остаточного газа. Из графиков видно небольшое увеличение потерь у пучка с большей интенсивностью. На рис.16 сравнивается поведение двух пучков близкой интенсивности с энергетическим разбросом, получаемым после прохождения тонкой неоднородной пленки, и без него. Видно, что пучок с энергетическим разбросом живёт лучше, чем в случае его отсутствия, тем более, что пучок с энергетическим разбросом имеет увеличенный эмиттанс.

На рис.17 сравниваются также два пучка близкой интенсивности для структур с "положительной и отрицательной массой". Видно, что для случая "отрицательной" массы потери пучка идут быстрее, несмотря на больший акцептанс кольца.

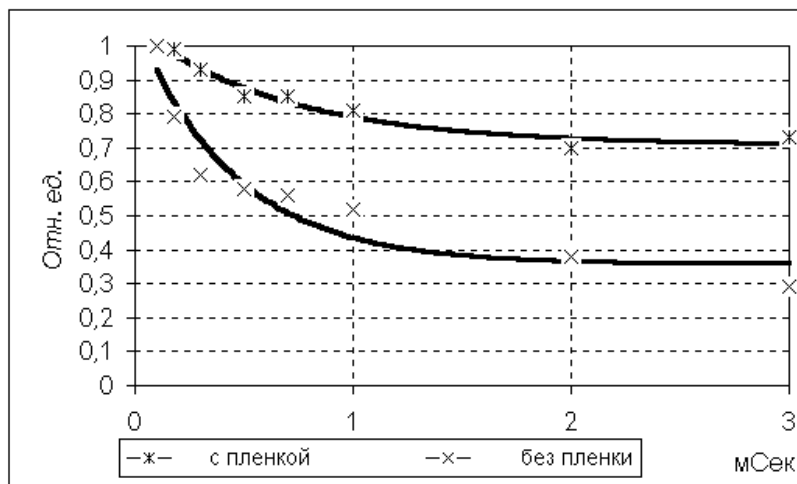


Рис. 16. Изменение интенсивности пучка во времени с внесением и без внесения энергетического разброса.

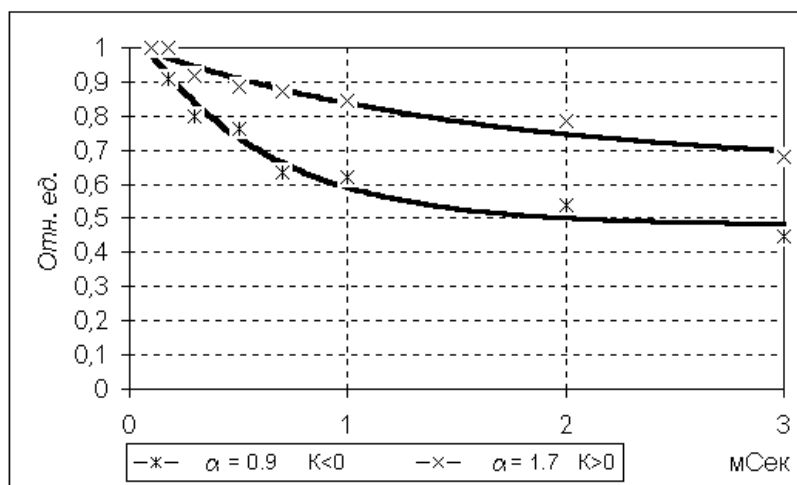


Рис. 17. Изменение интенсивности пучка во времени для разных значений коэффициента расширения орбит.

Из этих приведенных выше результатов экспериментов можно утверждать, что эффект отрицательной массы увеличивает потери частиц. Приведенные данные относятся к так называемому бетатронному режиму: постоянное магнитное поле и отсутствие ускоряющего напряжения. Обсудим возможные механизмы увеличения потерь. Наиболее очевидны следующие.

1. Увеличение радиального размера пучка. В эксперименте мы не можем измерить величину этого увеличения. Моделирование показывает, что изменение энергии протонов в пучке с числом частиц 10^9 достигает $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$. Это соответствует изменению радиуса равновесной орбиты порядка ± 4 мм, что существенно меньше размера апертуры. Поэтому влияние этого явления на потери частиц невелико. Однако при увеличении интенсивности до 10^{10} , этот эффект уже будет оказывать существенное влияние.

2. Периодическое изменение сил поперечного пространственного заряда из-за квази-синхротронного движения протонов усиливает потери частиц из-за возбуждения синхро-бетатронных резонансов

3. Согласно результатам магнитных измерений и исследования магнитной структуры пучком имеются существенные нелинейности магнитного поля, что приводит к уменьшению динамической апертуры. Квази-синхротронные колебания из-за эффекта отрицательной массы усиливают этот эффект. Эксперимент и моделирование показывают, что эффект отрицательной массы развивается даже при очень низких интенсивностях, поэтому уменьшение тока слабо влияет на характер потерь.

На основании выше изложенного есть основание полагать, что эффект отрицательной массы на установке ТРАПП в первую очередь приводит к уменьшению динамической апертуры из-за квази-синхротронных колебаний. Не исключены и другие механизмы влияния эффектов отрицательной массы.

Заключение

В работе показано хорошее совпадение теории, численного моделирования и результатов эксперимента по изучению эффекта отрицательной массы, проведенных на установке ТРАПП. Это совпадение относится к начальной стадии развития неустойчивости. Теория не описывает поведение пучка после его бунчировки.

С помощью численного моделирования можно проследить дальнейшую динамику образовавшихся сгустков, которая сводится к их относительному движению. В эксперименте наблюдается постепенное уменьшение числа сгустков. Это уменьшение, по-видимому, связано с другими неучтенными процессами, которые требуют дальнейшего изучения.

Литература

1. Balakin V.E., Skirinskiy A.N., Smirnov V.P., Valyaev Yu.D. TRAPP – Facility for Proton Therapy of Cancer. EPAC, Rome, June 7 11, 1988, v.2. p.1505.
2. Коломенский А. А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. МГУ, 1980.
3. C. Nielsen, A. Sessler, K. Symon. Proc. Internat. Conf. on High Energy Accelerators and Instrum., Geneva, 239 (1959).
4. Лебедев А.Н. ЖТФ, 9, с.1652, 1967.
5. Самойлов И.М. Соколов А.А. ЖТФ, 11, с.2012, 1965.
6. Хокни Р. Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц, Москва, Мир, 1987.
7. Рошаль А.С. Моделирование заряженных частиц, Москва, Атомиздат, 1979.