

41

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

Е.Н.Дементьев, Н.И.Зиневич, А.С.Медведко,  
В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
ПРОТОНОВ НА НАП - М

ПРЕПРИНТ 81 - 57



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО  
ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ НА НАП-М

Дементьев Е.Н., Зиневич Н.И., Медведко А.С.,  
Пархомчук В.В., Пестриков Д.В.

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе приведены результаты экспериментов по стохастическому охлаждению энергетического разброса пучка. Изучены зависимости декрементов затухания от фазовой плотности пучка, числа рабочих гармоник и величины коэффициента усиления цепи обратной связи. Установившийся разброс в пучке определялся шумами электроники. Обнаружена когерентная неустойчивость пучка, связанная с его смещением в измерительном пикап-электроде. Обсуждаются ограничения метода из-за шумов электроники и коллективных эффектов в интенсивных пучках.

## Введение

Метод стохастического охлаждения, предложенный С. Ван-дер-Меером [1], основан на использовании систем широкополосных обратных связей для охлаждения пучков тяжелых частиц в накопителях. В простейшем случае такая система состоит из пикап-электрода, измеряющего отклонение частицы от положения равновесия и корректирующего элемента (кикера), на который через широкополосный усилитель подается сигнал с пикап-электрода. Как показано в работах Я.С.Дербенёва и С.А.Хейфеца [2], эффект затухания связан с самодействием частицы через цепь обратной связи. Взаимодействие различных частиц пучка через цепь обратной связи приводит к своеобразному эффекту экранировки и увеличивает время охлаждения пропорционально числу частиц в пучке  $\sqrt{N}$ . Привлекательной особенностью метода стохастического охлаждения является слабая зависимость времени охлаждения от эмитанса охлаждаемого пучка.

В период 1974 по 1978 год в ЦЕРН на установках *ISR* и *ICE* были проведены эксперименты по изучению стохастического охлаждения [3]. В этих работах был продемонстрирован эффект охлаждения, а также выявлено увеличение времени охлаждения с ростом числа частиц в пучке.

К сожалению в этих работах, несмотря на обилие фактического материала, практически не приведены экспериментальные зависимости, скажем, времен охлаждения или установившихся размеров пучка от параметров цепи обратной связи, а также от разброса частот обращения частиц в пучке. Поэтому перенесение результатов работ [3] на другие установки затруднительно. Важность получения экспериментальных зависимостей усиливается здесь еще и тем, что процесс стохастического охлаждения описывается существенно нелинейным кинетическим уравнением, решения которого носят скорее оценочный характер.

В настоящей работе мы описываем результаты экспериментов по стохастическому охлаждению энергетического разброса протонного пучка в НАП-М. Целью этих экспериментов являлась оценка возможности использования этого метода охлаждения в установках для накопления антипротонов, а также изучение особенностей процесса охлаждения.

# I. Оценки декрементов охлаждения

Рассмотрим охлаждение энергетического разброса азимутально-однородного пучка с помощью системы, изображенной на рис. I. В качестве источника сигнала для цепи обратной связи (ОС) используется дифференциальный датчик, выполненный в виде двух полостковых линий, разомкнутых на конце. Величина разностного сигнала, наводимого частицей, пролетающей датчик, равна:

$$U(t) = \frac{evZ_0}{2\pi A\rho} \psi \Delta\rho \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\omega_p t} \frac{1 + e^{2in\theta_0\beta} - 2e^{in\theta_0(1+\beta)}}{2} \quad (I)$$

Здесь  $v = \beta c$ ,  $\omega_p, e$  - соответственно скорость, частота обращения и заряд частицы,  $\rho = M\gamma v$  - импульс равновесной частицы,  $\Delta\rho$  - отклонение импульса частицы от равновесного значения,  $\psi$  - дисперсионная функция накопителя,  $\theta_0 = L/R_0$  - азимутальная протяженность датчика,  $A$  - его апертура,  $Z_0$  - волновое сопротивление полостковых линий.

Разностный сигнал со входа линий подается через трансформатор на усилитель цепи ОС и, далее, на кикер, представляющий собой пролетную трубку с длиной, равной длине датчика. Если коэффициент передачи усилителя  $K_0$  постоянен в полосе  $|n| \leq n_{max}$  и равен нулю в остальной области частот, то напряжение на кикере

$$U(t) = \frac{evZ_0}{2\pi A\rho} \psi \Delta\rho K_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\omega_p(t-\tau_0)} \frac{1 + e^{2in\theta_0\beta} - 2e^{in\theta_0(1+\beta)}}{2} \quad (2)$$

$\tau_0$  - время задержки цепи ОС. Изменение импульса частицы для оптимальных значений времени задержки  $\tau_0$  и длины пикана  $\theta_0$  после прохождения пролетной трубки равно

$$\delta(\Delta\rho) \approx -3 \frac{e^2 Z_0 \psi}{2\pi A\rho} \Delta\rho \cdot K_0 \cdot n_{max}$$

Последнее равенство позволяет найти одночастичный декремент

$$\lambda_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \frac{\delta(\Delta\rho)}{\Delta\rho} = \frac{3Z_0\psi\tau_0 c}{2\pi A\gamma\beta} K_0 \cdot W \quad (3)$$

Здесь  $\tau_0 = e^2/Mc^2$  - классический радиус частицы,  $W = f_0 n_{max}$  - полоса пропускания усилителя. Как можно видеть из выражений (2), (3), величина декремента  $\lambda_0$  растет с увеличением полосы  $W$  до тех пор, пока  $n_{max} \Delta f/f_0 \leq 1$  ( $\Delta f$  - разброс частот обращения в пучке). При дальнейшем увеличении  $W$  частица и корректирующий

импульс могут приходить на ускоряющие концы пролетной трубки одновременно, что приведет к относительному уменьшению величины  $\lambda_0$ .

Помимо самодействия, приводящего к уменьшению разброса по импульсам в пучке, частицы испытывают случайные толчки, связанные с тепловыми шумами усилителя. Эти случайные воздействия и определяют установившийся разброс. Полагая, что шум усилителя определяется его входным сопротивлением, среднеквадратичное напряжение на выходе усилителя, согласно формуле Найквиста, равно:

$$\overline{U_{ш}^2} = 4kT Z_0 W K_0^2 \quad (4)$$

где  $T$  - температура,  $k$  - постоянная Больцмана. При этом скорость изменения разброса по импульсам в пучке определяется уравнением:  $\frac{d}{dt} \langle \Delta\rho^2 \rangle = -2\lambda_0 \langle \Delta\rho^2 \rangle + \frac{e^2 \overline{U_{ш}^2}}{v^2} f_0 [1 - g(w\tau)]$ , (5)

$$1 - g(w\tau) = \frac{1}{n_{max}} \sum_{n=0}^{n_{max}} |1 - \exp(in\omega_0\tau)|^2 \approx \frac{W^2 \tau^2}{3}$$

где  $g(w\tau)$  - корреляционная функция шума на выходе усилителя,  $\tau$  - время пролета ускоряющей трубки:

Из этого уравнения видно, что квадрат установившегося разброса по импульсам линейно растет с увеличением коэффициента усиления  $K_0$ . Поэтому значение декремента затухания до заданного установившегося разброса ограничено величиной

$$\lambda_0 = \frac{e^2 v Z_0 W}{kT R_0} \left[ \frac{R_0 \psi}{A} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{st} \right]^2 \frac{3\pi}{4 W^2 \tau^2} \quad (6)$$

$R_0$  - радиус равновесной орбиты.

Другое ограничение скорости затухания связано со взаимным влиянием частиц пучка через цепь обратной связи. Из-за конечной величины полосы пропускания усилителя сигнал, наведенный частицей, действует на соседние частицы, смещая их в направлении противоположном <sup>смещению</sup> данной, что уменьшает декремент охлаждения. Этот эффект исследовался во многих работах [2+6] и результат может быть выражен формулой [6]:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{N}{\Delta f n_{max}^2} \equiv \tau_0 + \tau_{эк} \quad (7)$$

$N$  - число частиц в пучке. Как видно из (7), описанный эффект экранирования приводит к увеличению времени охлаждения интенсив-

ных пучков с малым разбросом по импульсам.

Выше отмечалось, что максимальное число гармоник  $N_{max}$ , которое может эффективно участвовать в охлаждении, определяется разбросом частот обращения,  $N_{max} \leq f_0/\Delta f$ . Поэтому, если нет технических ограничений на диапазон рабочих частот системы, величина  $\zeta_{ок}$  на начальном этапе охлаждения может приближаться к

$$\zeta_{ок} = \frac{N}{W}; \quad \frac{\Delta f}{f_0} \sim \frac{f_0}{W}$$

Как видно из этого условия, для увеличения  $W$  необходимо уменьшать разброс частот обращения в пучке и, следовательно, увеличивать жесткость накопительного кольца при заданной величине  $\Delta P/\rho$ . Минимально возможный разброс частот обращения в этом случае определяется требованием когерентной устойчивости пучка.

## 2. Описание системы для охлаждения пучка на НАЦ-М

На рис. I приведена блок-схема системы охлаждения. Сигналы с двух радиальных пластин датчика поступают на вычитающий трансформатор, далее разностный сигнал усиливается предварительным усилителем, усилителем мощности и подается на кикер. Для изменения амплитуды и времени задержки сигнала обратной связи в цепь ОС введены переменные аттенуатор и линия задержки. Пластины датчика с внутренней поверхностью камеры накопителя образуют полосковые линии с волновым сопротивлением 50 Ом, разомкнутые на конце. Кикер изготовлен в виде четырех 50-омных согласованных полосковых линий, сигналы на которые подаются от четырех синфазных выходов усилителя мощности. Действие выполненного таким образом кикера на пучок эквивалентно действию обычной прелетной трубки. Датчик и кикер имеют одинаковую длину  $\beta c W/4$ , равную длине волны в пучке, соответствующей верхней частоте полосы пропускания цепи ОС.

Кроме этой системы, именуемой далее широкополосной, исследовалась система охлаждения с резонансным фильтром на входе. В качестве фильтра использовались отрезки коаксиального кабеля, образующие с полосковыми линиями датчика две резонансные линии, замкнутые на конце низкими входными сопротивлениями усилителей. Усиленные сигналы обоих каналов затем вычитаются на трансформаторе. Линии имеют электрическую длину, равную четверти длины

волны частоты обращения пучка. Поэтому фильтр пропускает лишь нечетные гармоники частоты обращения.

Фильтр, передавая рабочий спектр пучка, подавляет спектральные составляющие шумов входных усилителей и четверть-волновых линий вне своей полосы пропускания. Это позволяет иметь большой коэффициент усиления цепи обратной связи при заданной мощности выходного усилителя. С другой стороны, при достаточно высокой добротности фильтра можно улучшить отношение сигнал/шум на входе системы.

Следует отметить, что система с фильтром, пропускающая вдвое меньшее число гармоник частоты обращения пучка, позволяет провести экспериментальное изучение взаимного влияния частиц на декремент охлаждения при изменении числа рабочих гармоник.

Ниже приведены характеристики систем охлаждения:

	Широкополосная система	система с фильтром
Диапазон рабочих частот	100+300	100+300
Максимальный коэффициент усиления	$0,75 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$
Выходная мощность, Вт	4 x 0,5	4 x 0,5
Число гармоник	100	50
Коэффициент шума, Дб	2,5	3+4

Наблюдение за пучком в процессе охлаждения осуществлялось посредством измерения спектров дробовых шумов пучка. Непрерывный пучок, движущийся в накопителе, наводит на интегральный датчик сигнал, связанный с конечным числом частиц в пучке. Такой сигнал представляет собой дробовой шум со спектром, сосредоточенным вокруг гармоник средней частоты обращения. При этом ширина спектра  $N$ -ой гармоники определяется разбросом частот обращения  $n\Delta\omega$ , пропорциональным энергетическому разбросу частиц в пучке. Мощность такого сигнала, т.е. интеграл по спектру вокруг заданной гармоники  $n\omega_0$ , не зависит от разброса частот обращения  $\Delta\omega$ , а определяется полным числом частиц в пучке  $N$ .

Измерение спектра шумов проводилось на 8-й гармонике частоты обращения с помощью интегрального датчика системой, описанной в [7]. После двукратного сдвига частоты вниз исходный сигнал преобразовывался в цифровой код и передавался в ЭВМ. Анализ

сигнала в ЭВМ производился программой быстрого преобразования Фурье, определялись ширина спектра продольных шумов пучка и интеграл по спектру, несущий информацию о количестве частиц в пучке.

### 3. Экспериментальные результаты

НАИ-М — ускоритель протонов, сконструированный для проведения экспериментов по электронному охлаждению. Средний радиус машины 7,5 м, энергия инжекции протонов около 1,5 МэВ, эксперименты проводились на энергии 62 МэВ. При этом частота обращения пучка равнялась 2,21 МГц.

После ускорения размер пучка оказывался весьма малым. Поэтому для наблюдения эффекта стохастического охлаждения приходилось предварительно увеличивать разброс по импульсам в пучке. С этой целью на резонатор накопителя подавалось частотно-модулированное напряжение со средней частотой, равной частоте обращения частиц пучка. Модулирующая частота выбиралась примерно равной 20 Гц. Уровень модуляции по частоте и величина напряжения, подаваемого на резонатор, устанавливались таким образом, чтобы увеличение разброса по импульсам происходило без существенного увеличения амплитуд бетатронных колебаний частиц. В результате предварительного нагрева пучок перед включением обратной связи имел  $\Delta p/p \approx \pm 3 \cdot 10^{-4}$  ( $\Delta f/f_0 \approx \pm 3 \cdot 10^{-5}$ ).

Первоначально по уменьшению ширины спектра шумов пучка было выбрано оптимальное время задержки сигнала в цепи обратной связи. Характерное изменение спектра шумов показано на рис.2. Спектры нормированы на собственную амплитуду.

На Рис.3 показано сравнительное поведение пучка при включении отрицательной и положительной обратной связи. Видно, что при практически одинаковом изменении во времени числа частиц в пучке ( $\ln S$ ), ширина спектра уменьшается при отрицательной обратной связи и увеличивается при положительной обратной связи. В последнем случае максимальная ширина спектра определялась апертурными ограничениями.

В экспериментах ширина спектра охлаждаемого пучка уменьшалась до установившегося значения, которое определялось шумами электроники цепи обратной связи. На Рис.4 приведена зависимость

установившегося разброса частот обращения в пучке от величины одночастичного декремента затухания для системы с фильтром и широкополосной системы. То, что при одном и том же декременте в широкополосной системе охлаждения достигается меньший конечный размер, по-видимому, связано с лучшим согласованием по шумам входной цепи, большим числом рабочих гармоник в широкополосной системе, а также с невысокой добротностью фильтра в резонансной системе.

На Рис.5 показана зависимость декремента затухания от величины коэффициента передачи цепи датчик-кикер в середине рабочего диапазона частот. Данные приведены для широкополосной и резонансной систем. Прямые 1 и 3 соответствуют измерениям с малым числом частиц ( $N \approx 2 \cdot 10^7$ ). Существенное (приблизительно в 2 раза) отличие величин декрементов затухания  $\lambda$  для обеих систем при одинаковом коэффициенте усиления определяется отличием вдвое числа гармоник, участвующих в охлаждении.

Различие в числе гармоник существенно сказывается и в проявлении эффекта экранировки. В широкополосной системе при  $N \approx 10^8$  взаимное влияние частиц сказывается слабо (кривая 2), но уменьшение вдвое числа гармоник приводит к существенному увеличению времени охлаждения интенсивного пучка (кривая 4). Причем, начиная со значений  $K_0 \approx 0,8 \cdot 10^6$ , величина декремента практически не меняется, оставаясь на уровне  $\lambda \approx 1/8$  мин.

Как ранее отмечалось [7], постоянная времени затухания с учетом взаимного влияния частиц определяется соотношением:

$$\tau = \tau_0 + \frac{N}{\Delta f n^2},$$

$n$  — число рабочих гармоник системы,  $\tau_0$  — постоянная времени одночастичного затухания. Экспериментальная зависимость постоянной затухания  $\tau$  от величины  $N/\Delta f n^2$  приведена на рис.6 ( $\tau_0$  взято одинаковое для обеих систем). Видно, что полученные результаты находятся в хорошем соответствии с теоретическими предсказаниями.

### 4. Продольная неустойчивость пучка

В пучке с малым разбросом частот обращения при включении ОС наблюдалась продольная когерентная неустойчивость. Когерентный сигнал с интегрального датчика был виден в течение несколь-

ких секунд, после чего пропадал. При повторном включении цепи обратной связи когерентный сигнал не наблюдался. На Рис.7 показано типичное поведение мощности шума  $S$  и ширины спектра  $\Delta f$  при неустойчивости. В момент включения  $S$  резко возрастает, а  $\Delta f$  уменьшается, что отвечает монохроматизация сигнала. По мере развития неустойчивости  $S$  уменьшается, а  $\Delta f$  увеличивается до значений, соответствующих новому стационарному состоянию. На Рис.8 показано, что величина разброса частот обращения  $\Delta f_{st}$ , устанавливающаяся после неустойчивости, пропорциональна корню квадратному из тока пучка  $I_p$ .

$$\Delta f_{st} = A \sqrt{I_p}$$

Было установлено, что при заданном токе и коэффициенте усиления неустойчивость удается иницировать:

- 1) <sup>электронным</sup> охлаждением пучка до разброса ниже  $\Delta f_{st}$ ,
- 2) смещением положения пучка в датчике цепи обратной связи.

Уменьшение коэффициента усиления или тока пучка приводило к исчезновению неустойчивости.

Условие когерентной устойчивости пучка, взаимодействующего с системой стохастического охлаждения, может быть получено с помощью линеаризованного уравнения Власова. Пусть стационарное состояние пучка описывается функцией распределения  $F_0(p)$ . При возбуждении в пучке коллективного движения распределение  $F_0$  получает нестационарную добавку

$$F(p, \theta, t) = F_0(p) + \sum_{n \neq 0} F_n(p) e^{in\theta - i\omega t}, \quad (8)$$

которая вызывает появление на кикере ускоряющего напряжения с Фурье-амплитудой:

$$U_{n\omega} = \frac{evZ_0\psi}{Ap} K_0 \left[ 1 - e^{in\theta_0(1+\beta)} \right] \frac{1 + e^{2in\theta_0\beta} - 2e^{in\theta_0(1+\beta)}}{2} \times e^{-in\omega_0\tau} \int_{-\infty}^{\infty} dp p F_{n\omega}(p). \quad (9)$$

Используя уравнение Власова, запишем

$$F_{n\omega} = - \frac{iNe}{2\pi} \cdot \frac{U_{n\omega}}{2\pi R_0} \cdot \frac{1}{\omega - n\omega_p} \cdot \frac{\partial F_0}{\partial p}, \quad (10)$$

где из  $F_0$  выделено число частиц в пучке  $N$ .

Выделив в (10) момент  $\int_{-\infty}^{\infty} dp p F_{n\omega}(p)$ ,

получим дисперсионное уравнение для определения собственных частот  $\omega$ :

$$1 = - \Omega_n \int dp p \frac{\partial F_0}{\partial p} \cdot \frac{\Delta p}{\omega - n\omega_p}, \quad (11)$$

$$\Omega_n = i \frac{Nz_0cf_0Z_0\psi K_0}{2\pi A\beta} e^{-in\omega_0\tau} \frac{1 + e^{2in\theta_0\beta} - 2e^{in\theta_0(1+\beta)}}{2} \times \left[ 1 - e^{in\theta_0(1+\beta)} \right] \quad (12)$$

величина комплексного когерентного сдвига частоты вблизи  $n\omega_0$ .

Из уравнения (11) видно, что причиной неустойчивости пучка может быть смещение относительно центра датчика либо неполное вычитание сигналов с пластин, что также эквивалентно некоторому смещению пучка в датчике.

Для пучка с конечным разбросом по импульсам эта неустойчивость может стабилизироваться затуханием Ландау. Чтобы написать критерий устойчивости, удобнее переписать уравнение (11) в виде:

$$1 = - \Omega_n \cdot \frac{\Delta_n + n\Delta\omega_0}{n\omega_p'} \int dp p \frac{\partial F_0}{\partial p} \cdot \frac{1}{\Delta_n - n\omega_p' \Delta p}, \quad (13)$$

где  $\Delta_n = \omega - n\omega(\Delta p_0)$ ,  $\Delta\omega_0 = \omega_p' \Delta p_0 = \eta \frac{\Delta p_0}{p}$ ,  $\Delta p_0$  отвечает смещению пучка в датчике,  $\eta = \gamma^2 - \gamma_{cr}^2$ ,  $\gamma_{cr} mc^2$  - критическая энергия накопителя. Если менять  $\Delta_n$  вдоль действительной оси ( $\Delta_n \rightarrow \Delta_n + i0$ ), то уравнение (13) в параметрической форме определяет границу области устойчивости в плоскости комплексной переменной  $\Omega_n$ . Детальное поведение граничной кривой зависит от формы равновесного распределения  $F_0(p)$ . Видно, однако, что, если смещение пучка в датчике велико ( $|\Delta\omega_0| > \Delta\omega$ ,  $\Delta\omega$  - разброс частот обращения в пучке), то граница области устойчивости имеет обычную грушевидную форму, вытянутую вдоль оси  $Re \Omega_n$ . Поэтому критерий устойчивости можно записать в виде:

$$\Delta\omega^2 > \left| \Delta\omega_0 \frac{\Omega_n}{n} \right|, \quad |\Delta\omega_0| \gg \Delta\omega. \quad (14)$$

Подчеркнем, что, поскольку, неустойчивость обусловлена соотношением знаков  $Re \Omega_n$  и синхротронной массы  $\gamma$ , условие (I4) носит необходимый характер из-за того, что требуется обеспечить устойчивость всех гармоник рабочего диапазона.

Условие устойчивости (I4) ограничивает скорость охлаждения. Мы сравним это ограничение с тем, которое получается по эффекту экранировки. Для этого заметим, что в диапазоне гармоник, дающих наиболее существенный вклад в скорость охлаждения, величину  $|\Omega_n|$  можно приближенно записать в виде:

$$|\Omega_n| \approx \frac{N \lambda_0}{n_{max}} \cdot 2\pi, \quad (I5)$$

где  $\lambda_0$  — декремент затухания отдельной частицы. Эффект экранировки становится существенным, когда величина когерентного сдвига  $|\Omega_n|$  приближается (или превосходит) разброс частот обращения в пучке  $n \Delta \omega$ :

$$\lambda_0 \leq \lambda_{эк} = \frac{\Delta \omega n_{max}^2}{2\pi N}. \quad (I6)$$

Условие же когерентной устойчивости (I4) с учетом соотношений (I5) и (I6) можно переписать в виде:

$$\lambda_0 < \frac{\Delta \omega}{|\Delta \omega_0|} \cdot \lambda_{эк}. \quad (I7)$$

Отсюда видно, что для пучка, охлаждаемого вблизи центра датчика ( $|\Delta \omega_0| < \Delta \omega$ ), более жестким является ограничение скорости охлаждения по эффекту экранирования (I6). Однако при накоплении в продольном фазовом пространстве может осуществляться ситуация, когда пучок с относительно малым разбросом  $\Delta \omega$  помещается с большим отклонением  $\Delta \omega_0$  относительно центра области накопления  $|\Delta \omega_0| \gg \Delta \omega$ . В этом случае для обеспечения когерентной устойчивости пучка согласно (I7) необходимо снижение декремента  $\lambda_0$ , и, следовательно, скорости накопления.

### З а к л ю ч е н и е

В проведенных экспериментах было изучено влияние основных факторов (тепловых шумов электроники и взаимного влияния частиц) на эффективность стохастического охлаждения. Было получено время охлаждения маломощного пучка частиц, равное 150 сек при

уменьшении разброса с  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$ . Это хорошо соответствует ограничению из-за тепловых шумов: формула (6), дающая 170 сек. Один из способов ослабления этого ограничения был предложен в ЦЕРН<sup>[3]</sup> и заключается в использовании многих параллельных систем охлаждения. В этом случае установившийся размер такой же, как и для одной системы, а время охлаждения уменьшается обратнопропорционально числу систем. Так, в экспериментах на установке ICE при использовании системы с 12 пикапами и 12 кикерами было получено время охлаждения 15 сек<sup>[3]</sup>, что примерно отвечает результатам наших измерений.

Оценим мощность тепловых шумов на выходе усилителя в системе, обеспечивающей охлаждение за время  $\tau$ . Принимая значение апертуры в датчике равным минимально возможному  $A = R_0 \psi (\Delta p/p)_{in}$ , где  $(\Delta p/p)_{in}$  — начальный разброс по импульсам, и комбинируя формулы (3), (4) получим

$$P = \frac{4kT}{c^2 W q} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)_{in}^2 \left( \frac{2pR_0}{e^2 Z_0} \right)^2, \quad (I8)$$

$q$  — число параллельных систем. Из формулы (I8) видно, что мощность, требуемая для охлаждения пучка за время  $\tau$ , растет как квадрат разброса  $\Delta p/p$  и четвертая степень импульса (при фиксированной величине магнитного поля накопителя). Так, для 100 систем, охлаждающих пучок с импульсом  $p c = 4$  ГэВ и разбросом  $\Delta p/p = \pm 3 \cdot 10^{-2}$  в машине радиусом  $R_0 = 2,5 \cdot 10^3$  см,  $Z_0 = 50$  Ом,  $W = 500$  МГц,  $T = 300^\circ K$  за время  $\tau = 4$  сек, суммарная мощность усилителей  $P = 1,5 \cdot 10^5$  Вт.

Поэтому в проекте накопителя антипротонов А-А<sup>[8]</sup> предполагается использовать пучок с меньшим разбросом по импульсам  $\Delta p/p \approx 0,75 \cdot 10^{-2}$ ,  $\tau = 2,2$  сек, что позволяет ограничиться требуемой мощностью усилителей в 25 кВт.

Другое ограничение, связанное с эффектом экранировки и возможностью появления когерентной неустойчивости является более принципиальным при накоплении интенсивных пучков. Подробнее влияние этих эффектов на скорость накопления рассмотрено в работе<sup>[6]</sup>.

В заключение авторы выражают свою искреннюю признательность Н.С. Джанскому, И.Н. Мешкову и А.Н. Скринскому за стимулирующий интерес к работе, а также А.С. Калинину, М.М. Карлинеру и В.П. Черепанову за полезные обсуждения.



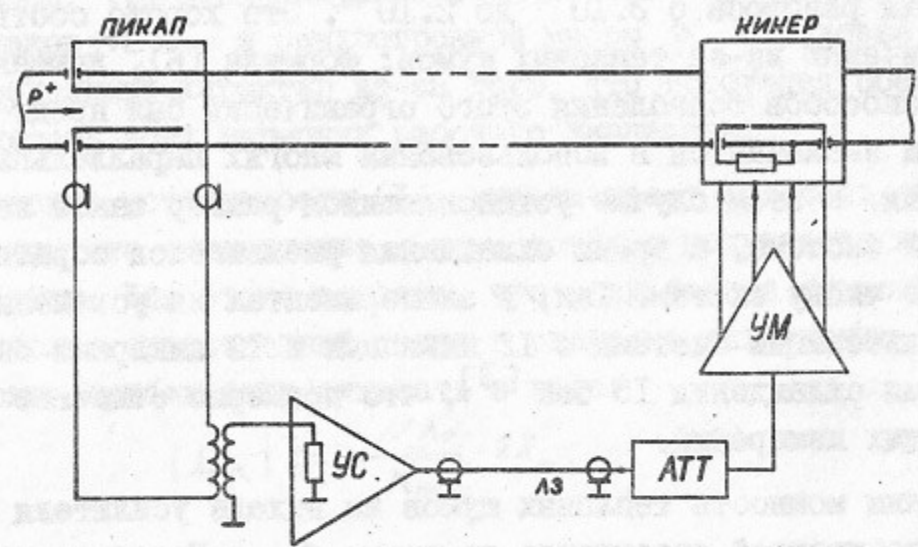


Рис.1 Блок-схема широкополосной системы стохастического охлаждения по импульсам.  
АТТ - аттенюатор. УМ - усилитель мощности.

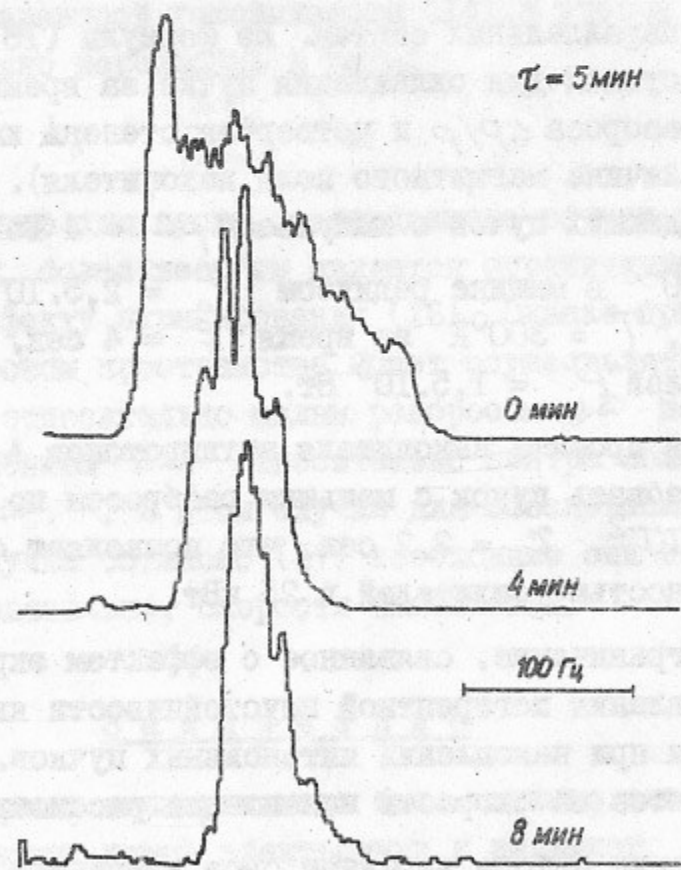


Рис.2. Широкополосная система. Спектры передних шумов пучка.

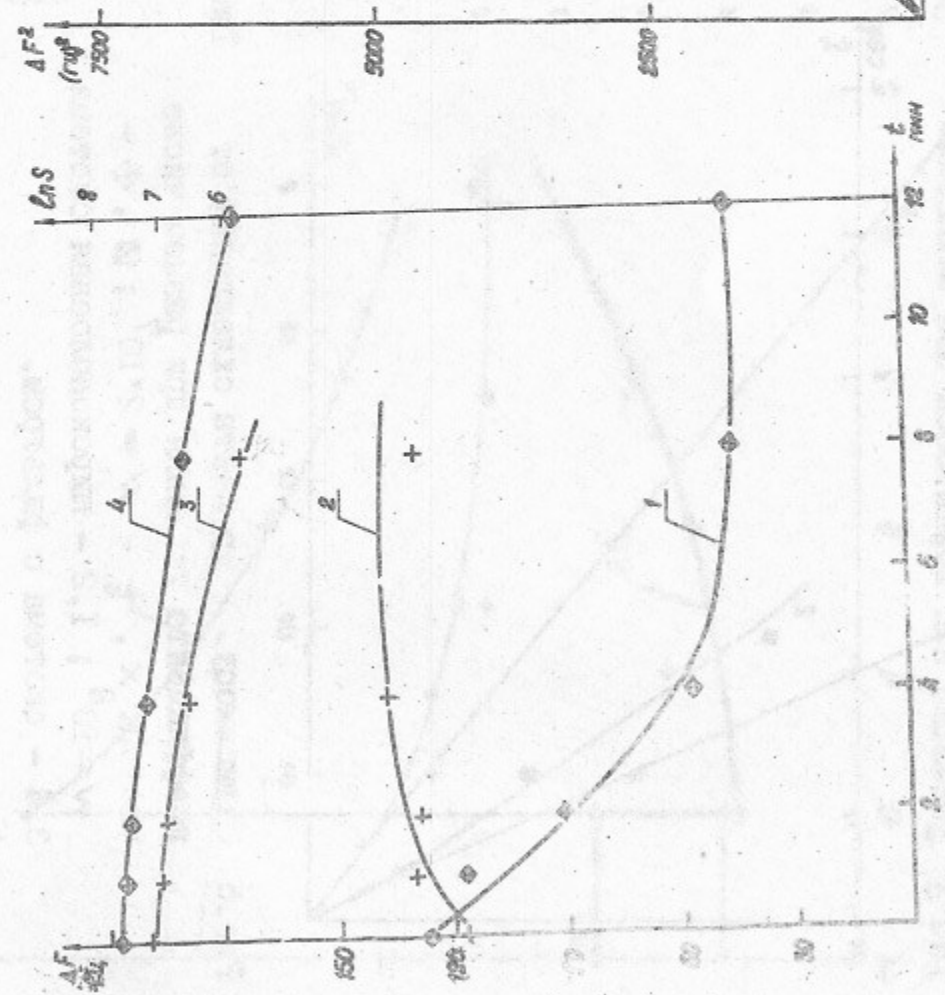


Рис.3. Широкополосная система. Изменение ширины спектра шумов  $\Delta F$  и тока  $I$  пучка от времени при различных знаках ОС. 1,2 - спектр; 3,4 - ток;  $\diamond$  - отрицательная ОС, + - положительная ОС.

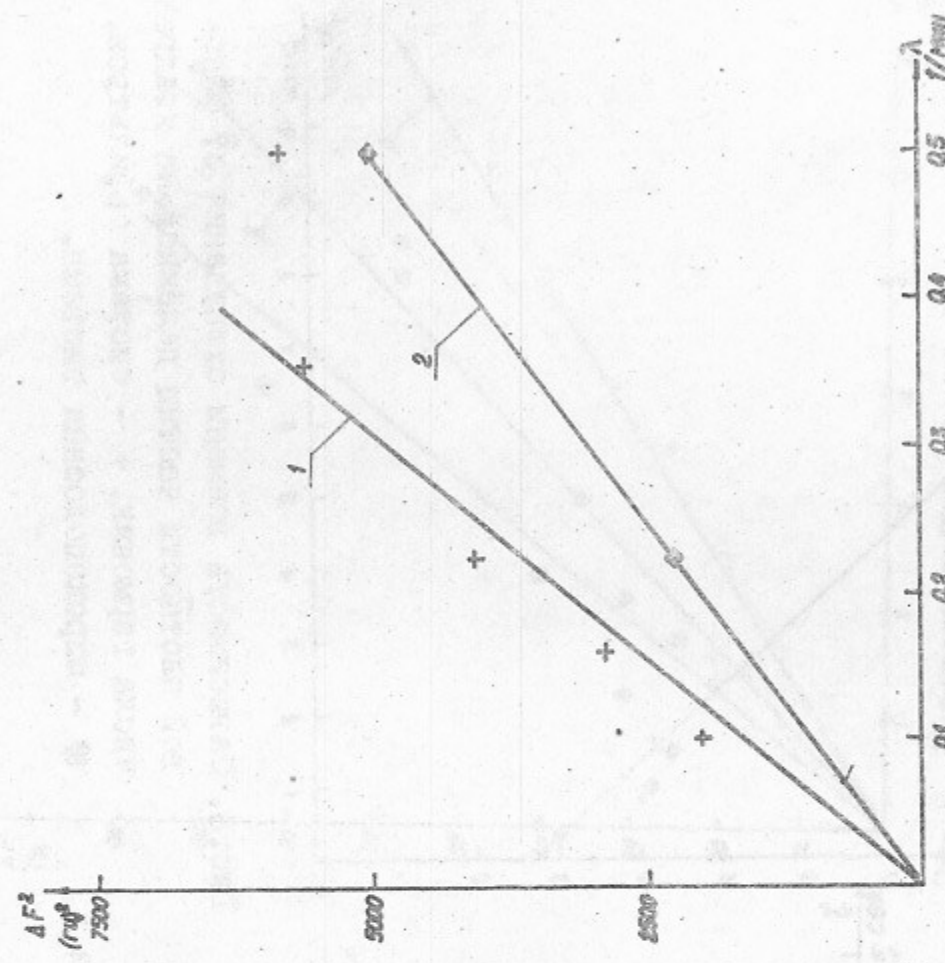


Рис.4. Зависимость квадрата установившегося разброса частот обращения от времени охлаждения; 1 - система с фильтром, 2 - широкополосная система.

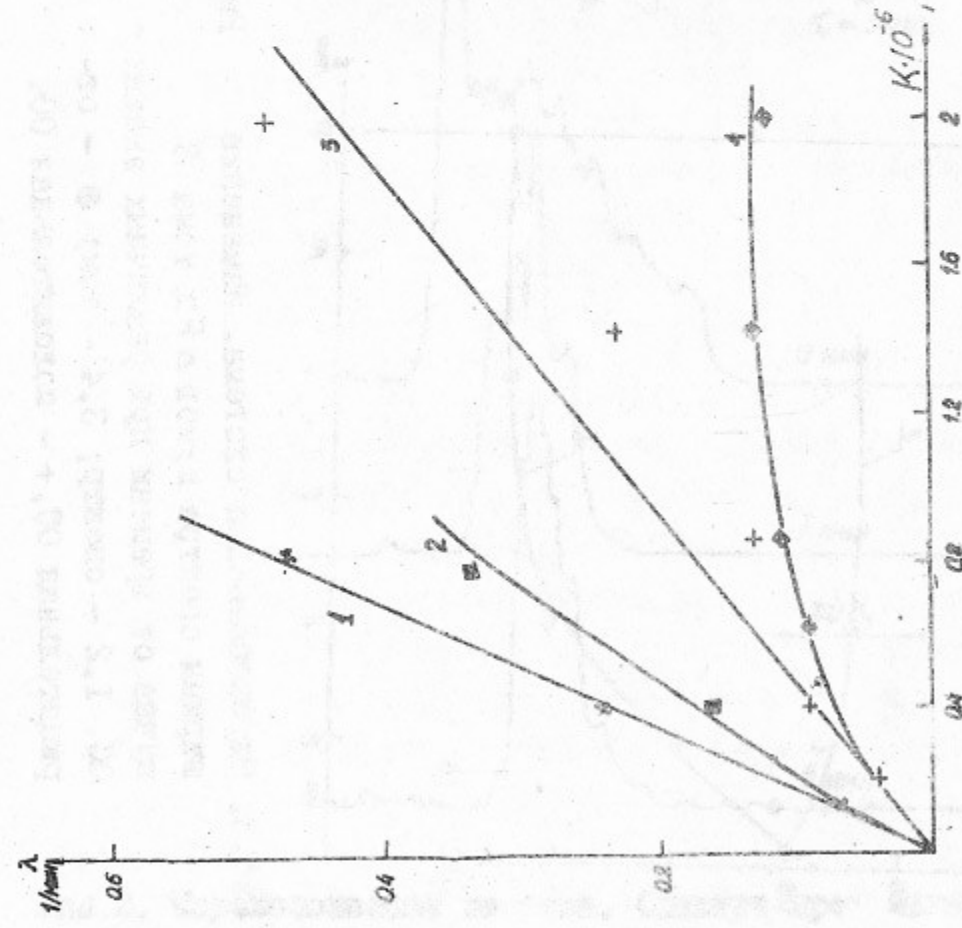


Рис.5. Зависимость параметра охлаждения от коэффициента усиления при разном числе частиц.  $\times$ ,  $+$  -  $N \approx 2 \cdot 10^7$ ;  $\square$ ,  $\diamond$  -  $N \approx 10^8$ ; 1, 2 - широкополосная система; 3, 4 - система с фильтром.

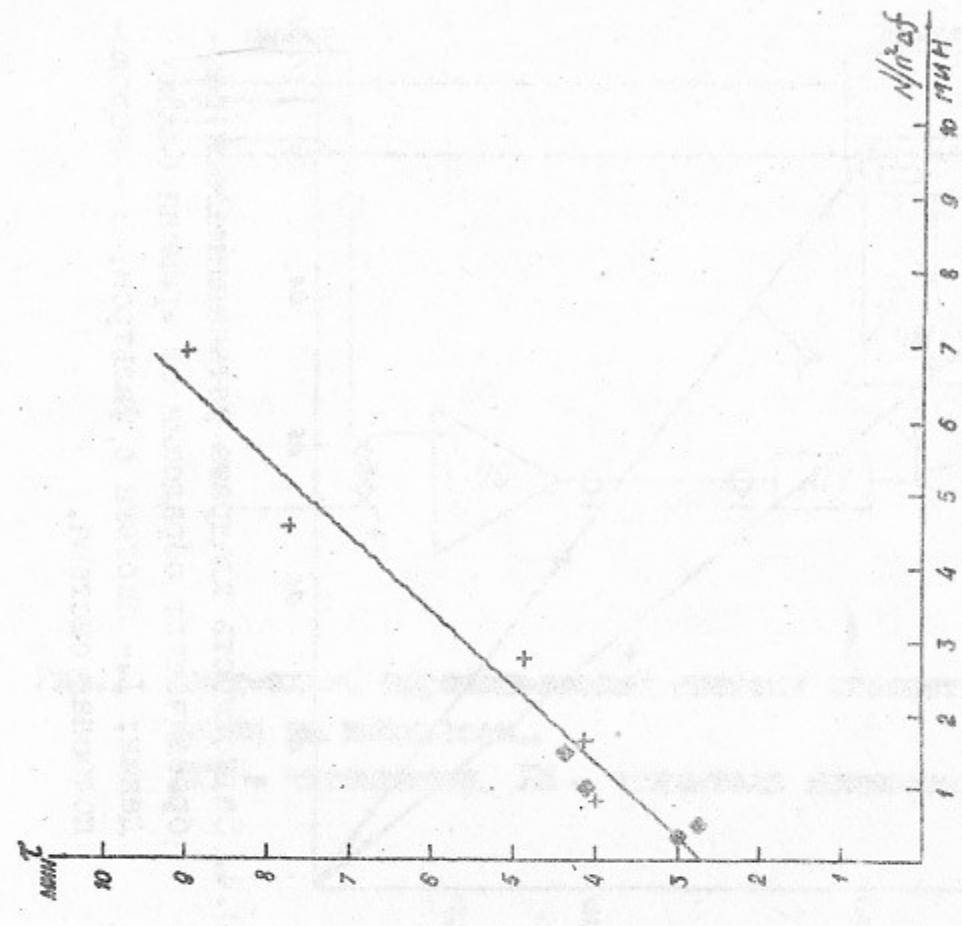


Рис.6. Зависимость времени охлаждения от фазовой плотности частиц делённой на квадрат числа гармоник.  $+$  - система с фильтром,  $\diamond$  - широкополосная система.

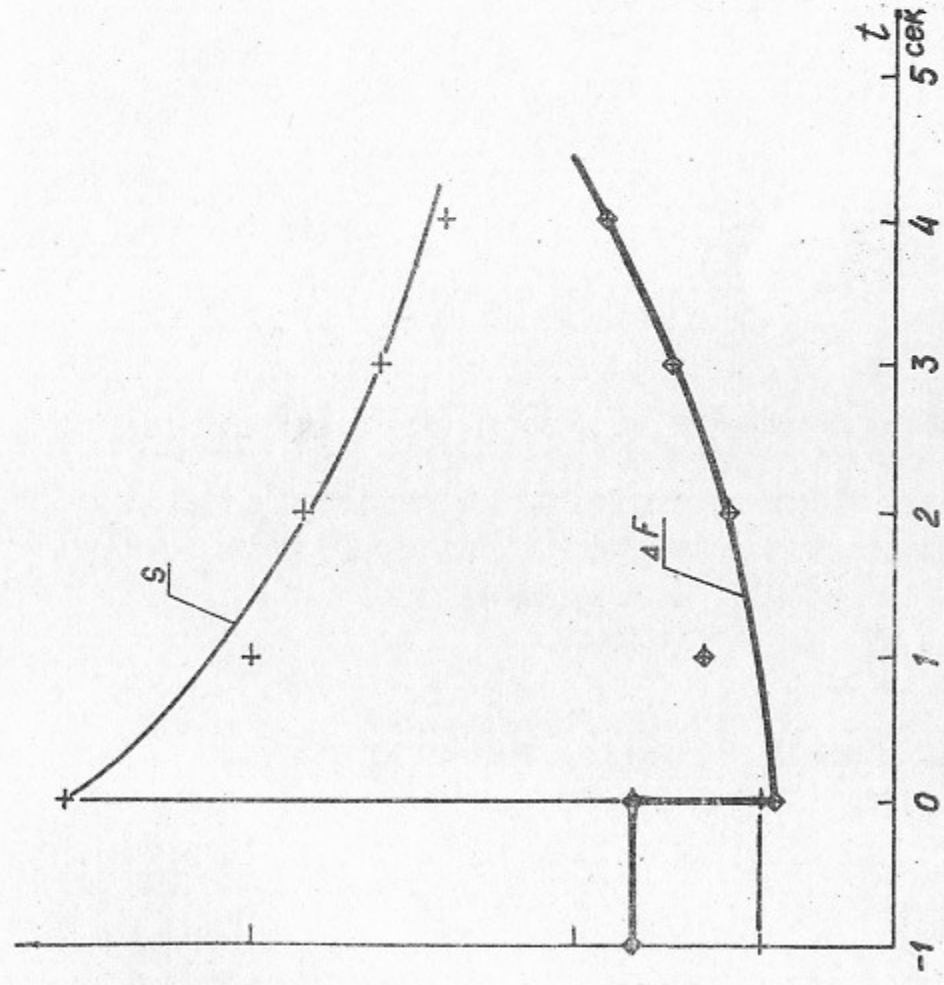


Рис.7. Развитие неустойчивости при включении стохастического охлаждения.  $S$  - интегральная мощность шумов,  $\Delta F$  - ширина спектра.

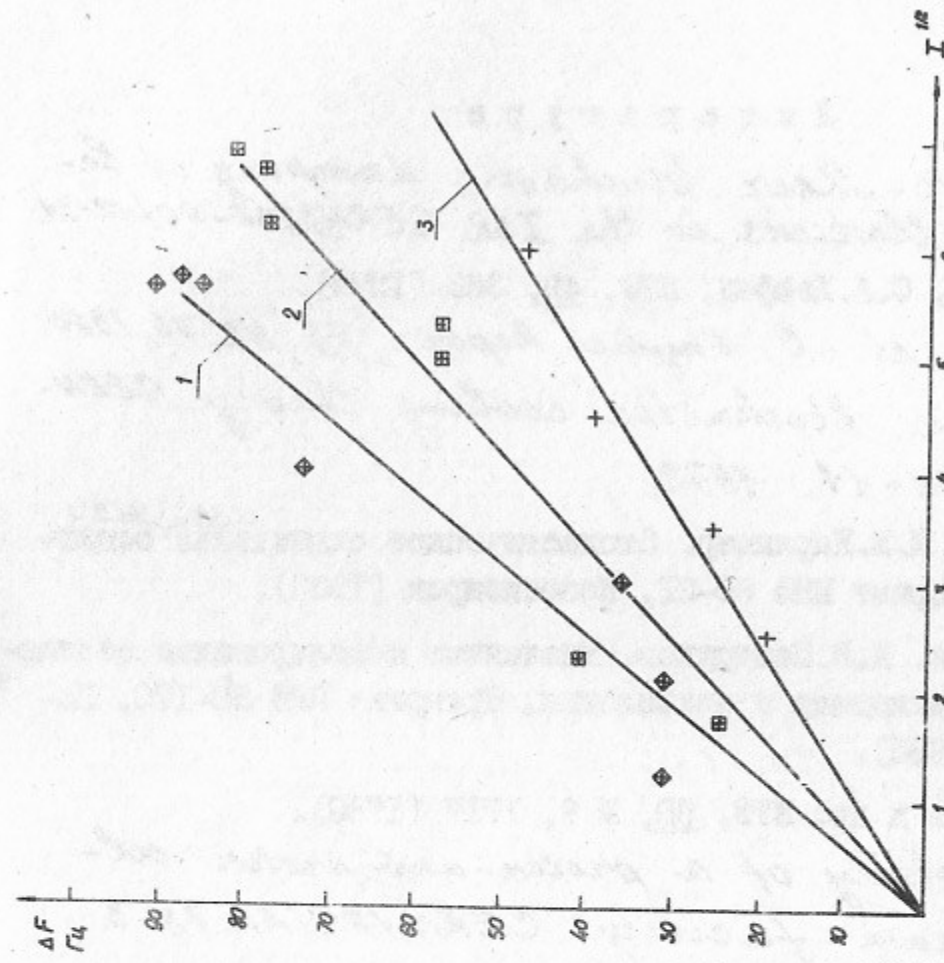


Рис.8. Установившийся размер  $\Delta F$  после неустойчивости от тока  $I$  для разных коэффициентов усиления цепи ОС: 1 -  $K = 2 \cdot 10^5$ ; 2 -  $K = 1,4 \cdot 10^6$ ; 3 -  $K = 0,5 \cdot 10^6$ .

### Литература

1. S. van-der-Meer. Stochastic damping of betatron oscillations in the ISR, CERN/ISR-PO/72-31.
2. Я.С.Дербенёв, С.А.Хейфец, ЖТФ, 49, 363 (1979).
3. D. Möhl, et al. Physics Reports, 58, N2, 76, 1980.
4. F. Sacherer. Stochastic cooling theory. CERN-ISR/TH/78-11. 1978.
5. Н.И.Зиневич, М.М.Карлинер. Стохастическое охлаждение <sup>системы</sup> осцилляторов. Препринт ИЯФ 80-21, Новосибирск (1980).
6. В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков. Численное моделирование стохастического охлаждения и накопления. Препринт ИЯФ 80-170, Новосибирск (1980).
7. Е.Н.Дементьев и др. ЖТФ, 50, № 8, 1717 (1980).
8. Design study of a proton-antiproton colliding beam facility. CERN/PS/AA.78-3. 1978.

1. D. S. ...  
 2. D. ...  
 3. K. A. ...  
 4. K. A. ...  
 5. K. A. ...  
 6. Design study of a ...

Работа поступила - 2 июня 1981 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г. Попов  
 Подписано к печати 15.VI.1981 г. МН 03182  
 Усл. 1,1 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.  
 Тираж 200 экз. Бесплатно  
 Заказ № 57

---

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР