

# Экспериментальное изучение динамической апертуры на накопителе ВЭПП-4М

В.А.Киселев, Е.Б.Левичев, В.В.Сажаев, В.В.Смалюк

*Институт ядерной физики СО РАН им.Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия*

## Введение

Область устойчивого движения изучалась с помощью возбуждения когерентных бетатронных колебаний быстрой импульсной раскачкой и регистрации тока/координат пучка с помощью пикапа. Предварительно исследовалось влияние конечных размеров пучка на измерения и характер потерь пучка вблизи границы устойчивости. Было найдено, что лишь "быстрые" (несколько десятков оборотов) потери пучка напрямую связаны с ДА, в то время как полные потери зависят от многих эффектов. Измерения проводились на энергии инъекции ВЭПП-4М  $E = 1,8$  ГэВ. Описание методики измерений приведены в [1]. Основные нелинейности ВЭПП-4М включают в себя секступольные коррекции хроматизма и октупольные погрешности поля магнитных элементов, в большей степени, линз финального фокуса, где  $\beta_{x,z} > 100$  м. Когерентные бетатронные колебания возбуждались "быстрым" кикером. Для регистрации использовался пикап *SRP3*. Точность определения координаты на каждом обороте для токов пучка  $I \simeq 1 \div 5$  мА составляет  $\sigma_x \simeq 100$  мкм,  $\sigma_z \simeq 70$  мкм.

## Измерение динамической апертуры

Предварительно исследовался механизм потери частиц при возбуждении когерентных колебаний большой амплитуды. Мы ожидали, что уменьшение интенсивности пучка за счет частиц, оказавшихся за пределами ДА должно быть достаточно быстрым, т.к. амплитуда частицы в неустойчивой области нелинейного движения растет экспоненциально.

При малых амплитудах удара потерь не происходит: все частицы оказываются внутри акцептанса. С ростом амплитуды интенсивность пучка начинает уменьшаться, однако факт влияния многих процессов на потери (в том числе затухания колебаний) не позволяет уверенно выделить часть, относящуюся к апертурным ограничениям. При дальнейшем увеличении амплитуды удара появляется характерное "выбивание" части пучка на первых десятках оборотов (рис.1). Полные потери пучка определяются суммой "быстрой" и "медленной" составляющих.

При этом нужно отметить поведение координаты центра тяжести пучка  $X_p$ , которая вычисляется по первым 30 оборотам (чтобы исключить затухание или "раскогерентчивание"). Пока нет "быстрых" потерь  $X_p$  зависит от напряжения на пластинах  $U$  линейно:  $X_p = KU$ . Однако, при увеличении амплитуды и выбивании пучка эта зависимость существенно отклоняется от линейной (рис.2), так как за 30 оборотов диффузионные процессы не успевают восстановить нормальное распределение плотности частиц, и центр тяжести  $X_p$ , измеряемый пикапом, отличается от истинного "заброса" пучка  $X_0$ .

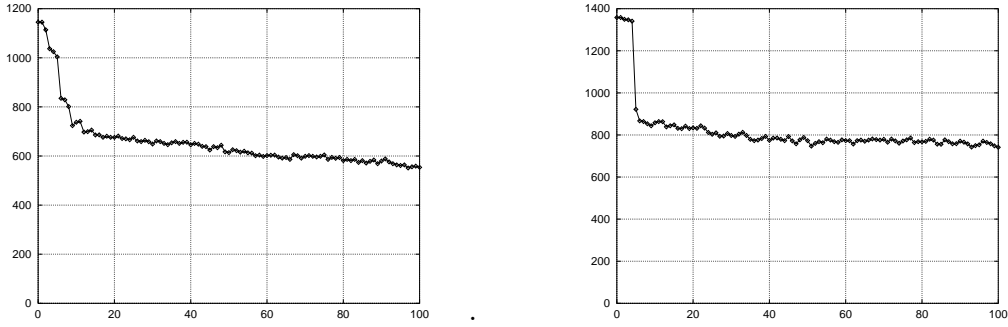


Рис. 1: Потери пучка из-за динамической (слева) и геометрической (справа) апертур (100 оборотов).

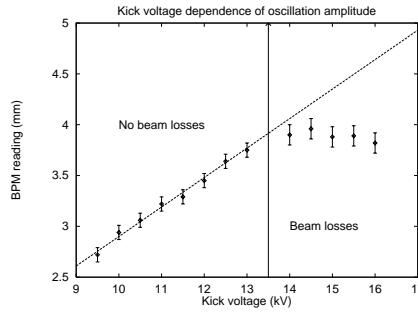


Рис. 2: Зависимость амплитуды заброса пучка от силы удара.

Результаты экспериментального и теоретического исследований позволили заключить, что "быстрые" (за время 20-30 оборотов пучка) потери действительно несут информацию об апертурных ограничениях. Исходя из этого, мы пользовались следующей методикой для измерения ДА. В области линейной зависимости  $X_p$  от  $U$  находился коэффициент  $K = X_0/U$ . Затем напряжение увеличивалось до значения  $U_{0.5}$ , когда отношение интенсивности пучка, оставшегося после 20 оборота,  $I_{20}$  к исходному  $I_0$  равно  $\kappa = I_{20}/I_0 \simeq 0,5$ . После этого ДА определялась как  $A_x = KU_{0.5}$ .

Измеренные таким образом значения апертуры для стандартного режима инъекции ВЭПП-4М на азимуте пикапа *SRP3* и некоторые другие данные приведены ниже:

$$\begin{aligned} A_x &= 4.5 \text{ мм}, & A_z &= 5.1 \text{ мм}, \\ \sigma_x &= 0.55 \text{ мм}, & \sigma_z &= 0.42 \text{ мм}, \\ \beta_x &= 4 \text{ м}, & \beta_z &= 12 \text{ м}. \end{aligned}$$

Чтобы определить, динамическая или геометрическая апертуры ограничивают движение, мы рассмотрели потери пучка, вводя подвижный пробник с точностью перемещения 0,1 мм. Рис.1 показывает отличие между ДА и механическим ограничением: для последнего характерна мгновенная (за время одного оборота) гибель части пучка.

Для ВЭПП-4М характер потерь позволяет заключить, что горизонтальное движение ограничено динамически нелинейными эффектами, в то время как вертикальная апертура обусловлена механическим ограничением.

## Анализ полученных результатов

Численное моделирование нелинейных эффектов ВЭПП-4М с известными из магнитных измерений нелинейностями (коррекции хроматизма) показало, что расчетная ДА (рис.3) значительно больше измеренной. Для возможного объяснения различия между теорией и экспериментом рассмотрим аналитически границу ДА вблизи резонанса  $3\nu = m$ . По причинам, описанным выше мы исследуем случай горизонтального движения.

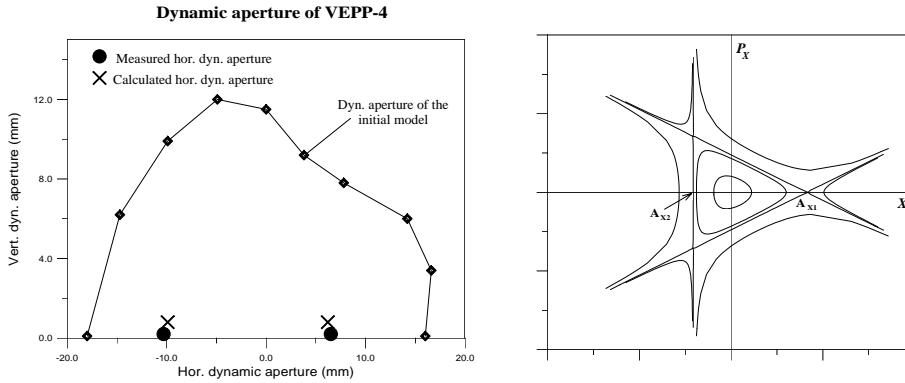


Рис. 3: Слева: ДА ВЭПП-4М (идеальная структура); горизонтальная ДА измеренная и оцененная из гамильтониана (с учетом экспериментальных данных). Справа: фазовое пространство вблизи резонанса  $3\nu_x = m$ .

В нашем случае гамильтониан изолированного резонанса в переменных "действие  $J_x$  - фаза  $\phi_x$ " с нелинейностью  $\alpha$  имеет вид

$$H_r = \delta J_x + \alpha J_x^2 + f J_x^{3/2} \cos 3\phi_x, \quad (1)$$

где  $f = 2\sqrt{2}A_3$ ,  $A_3$  — азимутальная гармоника возмущения,  $\delta = \nu_x - m/3$  — резонансная расстройка, а действие связано с амплитудой колебаний как  $a_x(s) = \sqrt{2\beta_x(s)J_x}$ . Изучение гамильтониана (1) показывает, что устойчивое движение ограничено точками  $J_{x1}$  ( $\phi_x = 0$ ) и  $J_{x2}$  ( $\phi_x = \pi$ ). Точка  $J_{x1}$  является неустойчивой особой точкой и записывается как

$$J_{x1} = \frac{3f}{8\alpha} \left[ \left( 1 + \frac{32}{9} \frac{\delta\alpha}{f^2} \right)^{1/2} - 1 \right]. \quad (2)$$

Точка  $J_{x2}$  определяется из  $H_r = const$  для инвариантной фазовой кривой, т.е.  $H_r(J_{x1}, 0) = H_r(J_{x2}, \pi)$ . Получающееся уравнение четвертого порядка удобнее решать численно.

Чтобы найти возмущение  $f$  и нелинейность  $\alpha$  воспользуемся результатами работы [1]. Необходимые выводы могут быть сформулированы следующим образом: для  $\nu_x = 8,620$  измеренная величина гармоники  $A_3 \simeq -3,1 \text{ м}^{-1/2}$  находится в согласии с расчетной; напротив, измеренная нелинейность значительно больше той, которая получается из модельных представлений:  $\alpha = 3600 \text{ м}^{-1}$ . Источником ее, по-видимому,

является октупольная компонента поля квадрупольных линз финального фокуса, где  $\beta_{x,z} > 100$  м. При подстановке указанных значений амплитуды гармоника возмущения и нелинейности на азимуте пикапа *SRP3* ( $\beta_x = 4$  м) можно получить следующие размеры горизонтальной ДА:

$$A_x = (+5.1\text{мм}, -3.3\text{мм}). \quad (3)$$

Для сравнения с измерениями нужно взять среднее по модулю от этих значений (так как определяемая по пикапу амплитуда является усредненной по некоторому числу колебаний)  $A_x = 4,2$  мм, что хорошо совпадает с экспериментальным значением  $A_x = 4,5$  мм. На рис.3 показана ДА ВЭПП-4М для "идеальной" структуры (линия), а также измеренная (кружок) и рассчитанная с учетом экспериментального значения нелинейности (крестик) горизонтальная апертура. График соответствует центру технического промежутка ВЭПП-4М, где  $\beta_x = 14$  м,  $\beta_z = 3$  м.

### Увеличение динамической апертуры

Для увеличения ДА можно либо уменьшить амплитуду гармоника секступольного возмущения  $f = 2\sqrt{2}A_3$ , либо уменьшить нелинейность  $\alpha$ , либо использовать эти оба варианта одновременно.

Так как основной вклад в гармонику возмущения на ВЭПП-4М создается секступольными линзами места встречи *SES2* и *NES2*, для уменьшения гармоника мы уменьшали силу этих линз (ток питания был снижен с 8,4 до 4,3 А). Остаточный хроматизм компенсировался секступольными коррекциями в полукольцах, слабо влияющими на амплитуду гармоника.

Горизонтальная нелинейность в нашем случае определяется не хроматическими секступолями, а октупольными погрешностями поля линз финального фокуса [1]. Для уменьшения нелинейности (приблизительно в два раза) мы применяли октупольные коррекции, заложенные в магнитах полуколец, не используемые в номинальном режиме.

Уменьшение гармоника секступольного возмущения приводит к заметному увеличению горизонтальной ДА до  $A_x = 7$  мм (более 1,5 раз). Напротив, при уменьшении нелинейности, апертура увеличивается только до 5,4 мм. Комбинация двух подходов одновременно также оказывается хуже, чем только уменьшение секступольной гармоника: горизонтальная ДА при этом становится равной 5,9 мм. Возможно, октупольные коррекции возбуждают на границе динамической апертуры дополнительные резонансы высокого порядка, которые, перекрываясь, создают стохастический слой, препятствующий расширению области устойчивости. Данный факт требует дополнительного изучения.

### Список литературы

- [1] В.А.Киселев, Е.Б.Левичев, В.В.Сажаев, В.Смалюк. Экспериментальное исследование нелинейной динамики на накопителе ВЭПП-4М. – Настоящий сборник, стр.61-64.