

ИЗУЧЕНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ОБЛАСТЬ АВТОФАЗИРОВКИ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗА СЧЕТ РАДИАЦИОННОГО ЗАТУХАНИЯ

Н. С. ДИКАНСКИЙ, Г. Н. КУЛИПАНОВ, Б. А. ЛАЗАРЕНКО
С. И. МИШНЕВ, С. Г. ПОПОВ

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск
Докладчик С. И. Мишнев

1. Эксперименты по изучению прохождения частиц через область автофазировки бетатронных колебаний (ОБА) линейного (внешнего) резонанса были сделаны на электронном накопителе ВЭП-1 [1, 2]. Линейный резонанс создавался резонансной раскачкой вертикальных бетатронных колебаний на частоте $f_p = f_0 - f_z(a)$, где $f_0 = 110,5$ МГц частота обращения, $f_z(a)$ — зависящая от амплитуды частота вертикальных бетатронных колебаний. Кубичная нелинейность $\frac{\partial f_z}{\partial a^2} = 0,85 \frac{\text{МГц}}{\text{см}^2}$ возникает вследствие нелинейности магнитного поля накопительной дорожки. Параметры ОБА можно было контролировать с хорошей точностью ($\sim 10\%$): равновесную амплитуду — по распределению плотности, измеренному с помощью диссектора, а полуширину области автофазировки в Δa можно определить по формуле [2]:

$$\Delta a = \frac{f_\phi}{a_0 \frac{\partial f_z}{\partial a^2}} \quad (1)$$

где f_ϕ — частота фазовых колебаний в ОБА, которую можно измерить непосредственно методом резонансного возбуждения. Стабильность параметров во времени обеспечивалась высокой стабильностью частоты бетатронных колебаний:

$$\delta v_z = \left(\frac{\delta f_z}{f_0} \right) \approx \pm 0,5 \cdot 10^{-4}.$$

Оптическая система для наблюдения за пучком показана на рис.

1а. Поперечное сечение пучка электронов (1) проектировалось линзой (2) через полупрозрачное зеркало (3) на диссектор (для измерения распределения плотности пучка в вертикальном направлении) [3] и на щелевую диафрагму со щелью шириной $\delta \approx 10^{-2}$ см (4), за которой торой находился ФЭУ.

Эксперимент проводился следующим образом: часть пучка из центральной области устойчивости (рис. 1б, (1)) затягивалась путем перестройки частоты генератора резонансной раскачки в ОБА с равновесной амплитудой a_{01} (рис. 1б, (2)). Затем включался второй генератор резонансной раскачки, который создавал пустую (без частиц) ОБА с равновесной амплитудой $a_{02} < a_{01}$. После быстрого (за время порядка 10 мсек) выключения первого генератора пучок, находившийся в дальней ОБА, уменьшал свою амплитуду за счет радиационного затухания. При этом часть его захватывалась в промежуточную ОБА (рис. 1б, (3)), а оставшаяся часть затухала до малых амплитуд. ФЭУ со щелевой диафрагмой позволял наблюдать за прохождением частицами заданной амплитуды Z_0 .

Число частиц в ОБА можно измерить по осциллограмме распределения плотности, полученной с диссектора. Чтобы избежать ошибки, которую дает диссектор при больших амплитудах бетатронных колебаний, нужно ввести поправочный коэффициент, который можно определить, переводя (путем перестройки частоты генератора) одно и то же число частиц из дальней ОБА в ближнюю и сравнивая распределения плотностей в обоих случаях.

2. Теоретически вопрос о захвате в ОБА за счет радиационного трения рассматривался в [4], где было получено, что при равномерном распределении частиц по фазам бетатронных колебаний вероятность захвата (отношение числа захваченных частиц к числу частиц в дальней ОБА) не зависит от величины радиационного затухания и равна:

$$W_c = \frac{|I_c|}{|I_c| + |I_1|} \approx \frac{2}{1 + \frac{\pi a_0}{4 \Delta a}} \quad (2)$$

где $|I_c|$ — фазовый объем ОБА,

$|I_1|$ — фазовый объем области малых амплитуд, лежащей внутри ОБА; приближенная формула справедлива при $\Delta a \ll a_0$.

На рис. 2 показана зависимость вероятности захвата от параметров промежуточной ОБА (полуширины Δa_2 и равновесной амплитуды a_{02}), экспериментальная и рассчитанная по формуле (2). Измерения были проведены на двух энергиях $E_1 = 120$ Мэв и $E_2 = 80$ Мэв время радиационного затухания при этом различается в $\frac{\tau_2}{\tau_1} \approx \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^3 \approx 3,5$ раза. Из рис. 2а видно, что вероятность захвата не зависит от времени зату-

хания. Было проверено также влияние на захват в ОБА стохастического процесса, такого как многократное рассеяние на атомах остаточного газа, который мог бы изменить условия перехода через границу ОБА. Оказалось, что при изменении вакуума от $P=0,5 \times 10^{-7}$ торр до $P=2,5 \times 10^{-7}$ торр вероятность захвата не изменилась.

Вероятность захвата не зависит от начальной амплитуды бетатронных колебаний, но надо иметь в виду, что первоначально частицы находились в дальней ОБА и, следовательно, были сфазированы. После выключения первого генератора частицы теряют фазировку за счет начального разброса по амплитудам за время:

$$\Delta t_1 \approx \frac{1}{2a_{01} \delta a \frac{\partial f_z}{\partial a^2}} \approx 0,1 \text{ мсек},$$

где $a_1 \approx 0,6$ см — начальная амплитуда бетатронных колебаний;

$\delta a \approx 0,01$ см — начальный разброс по амплитудам.

На самом деле время раскогерирования несколько больше, т. к. наблюдается эффект повторной фазировки частиц, но во всяком случае можно считать, что за время $\Delta t'_1 \approx 0,5$ мсек когерентность теряется полностью. Время радиационного затухания от начальной амплитуды $a_{01} \approx 0,6$ см до внешней границы ОБА, в которую захватываются частицы, составляет $\Delta t_2 > 5$ мсек поэтому можно считать, что условие равномерного распределения частиц по фазам соблюдается с хорошей точностью.

3. С помощью диафрагмированного ФЭУ изучалось поведение частиц, не захваченных в ОБА. Осциллограммы с ФЭУ показаны на рис. 3а; момент запуска осциллографа соответствует моменту выключения первого генератора. Было измерено время, необходимое частицам, чтобы уменьшить амплитуду бетатронных колебаний с начальной величины $a_{01} = 0,58$ до величины $Z_0 = 0,1$ см, заданной положением щели, в зависимости от ширины ОБА (рис. 4). Эксперимент проводился на энергии $E = 120$ Мэв, время радиационного затухания вертикальных бетатронных колебаний $\tau_z = 45$ мсек. Проходя ОБА, незахваченные частицы скачком (периодом фазовых колебаний в ОБА можно пренебречь по сравнению со временем затухания) уменьшают амплитуду бетатронных колебаний на величину $2 \Delta a$, чем и определяется опережение максимума импульса на ФЭУ по сравнению со случаем без промежуточной ОБА. Этот эффект аналогичен механизму «фазового смещения», известному в теории продольного движения частиц в ускорителях [7]. При большой величине ОБА наблюдается затягивание импульса (рис. 3а, (3)), которое можно объяснить большими биениями амплитуды бетатронных колебаний частицы в области, внутренней по отношению к ОБА.

Изучался также случай прохождения частиц через ОБА, разру-

шенную второй, рядом лежащей ОБА [5]. Если мощность второй ОБА невелика (составляет не больше половины от мощности основной ОБА), то согласно [6], на границе ОБА образуется стохастический слой, в котором амплитуда частицы испытывает диффузию. В этом случае наблюдается, во-первых, уменьшение захвата в ОБА, а во-вторых, появление на осциллограммах (рис. 3б, (3)) длинного экспоненциального «хвоста», соответствующего частицам, которые некоторое время диффундировали в стохастическом слое, а затем вышли в область малых амплитуд, где испытывают нормальное радиационное затухание. При одинаковых мощностях обеих ОБА область стабильности исчезает (нет захвата частиц в ОБА), а длина «хвоста» частиц, выпадающих из диффузионной области, возрастает.

В заключение авторы выражают свою благодарность Я. С. Дербеневу, А. Н. Скринскому и Г. М. Тумайкину за обсуждение результатов работы; А. П. Чабанову — за помощь в проведении эксперимента.

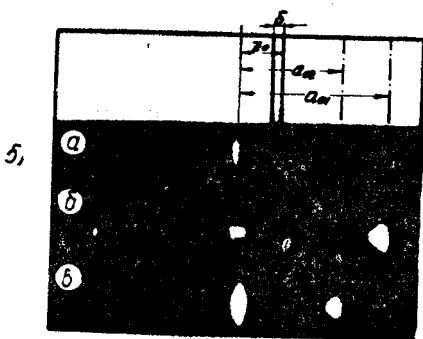
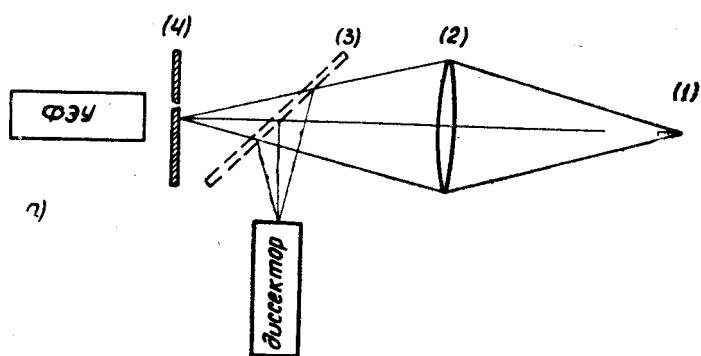


Рис. 1

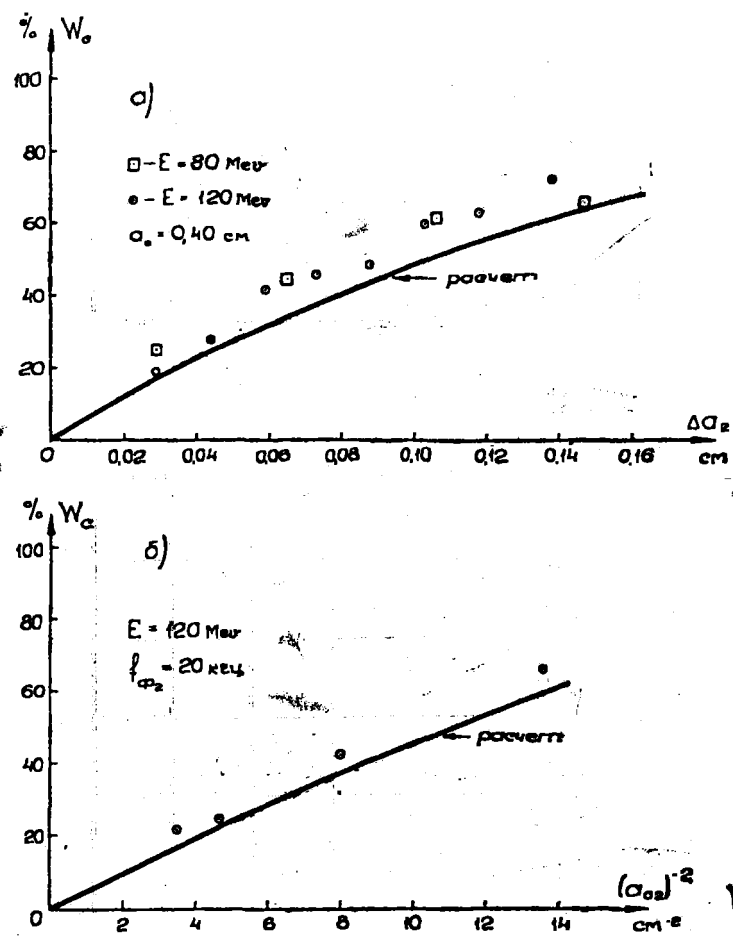


Рис. 2. Вероятность захвата в ОБА в зависимости:
 а) от полуширины ОБА Δa_2 ($a_{02} = 0.40$ см);
 б) от равновесной амплитуды a_{02} ($f_{\phi_2} = 20$ кГц, $E = 120$ МэВ).

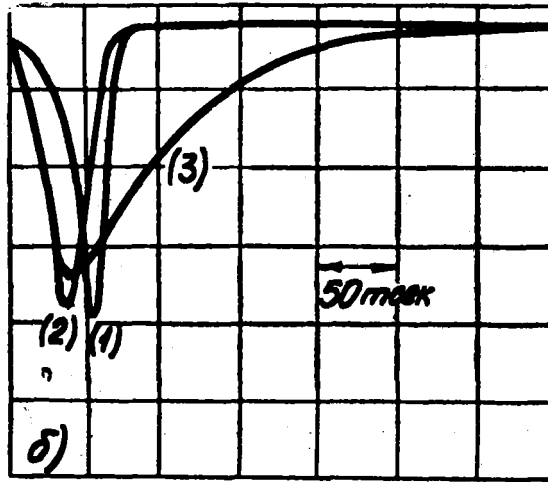
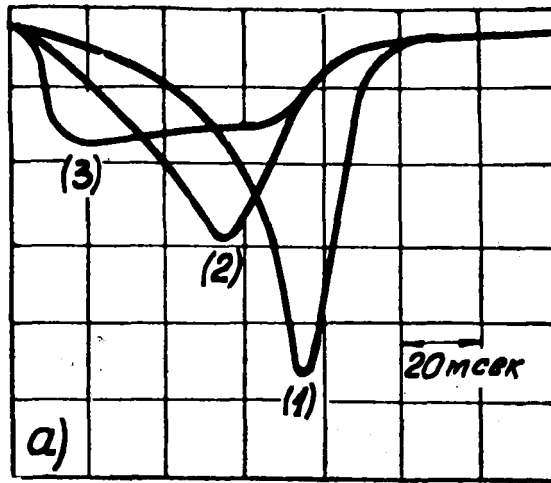


Рис. 3. Осциллограммы сигнала с диафрагмированного ФЭУ: 1а и 1б—без промежуточной ОБА; 2а—с промежуточной ОБА, $\Delta a_2=0,10$ см 3а—то же, $\Delta a_2=0,17$ см 2б—то же, $\Delta a_2=0,08$ см; 3б—с диффузионной областью, образованной двумя близкими, одинаковыми по мощности ОБА (ширина ОБА $\Delta a=0,08$ см, расстояние между центрами $0,03$ см). Равновесная амплитуда ОБА $a_{02}=0,29$ см, начальная амплитуда $a_{01}=0,58$ см; энергия $E=120$ Мэв.

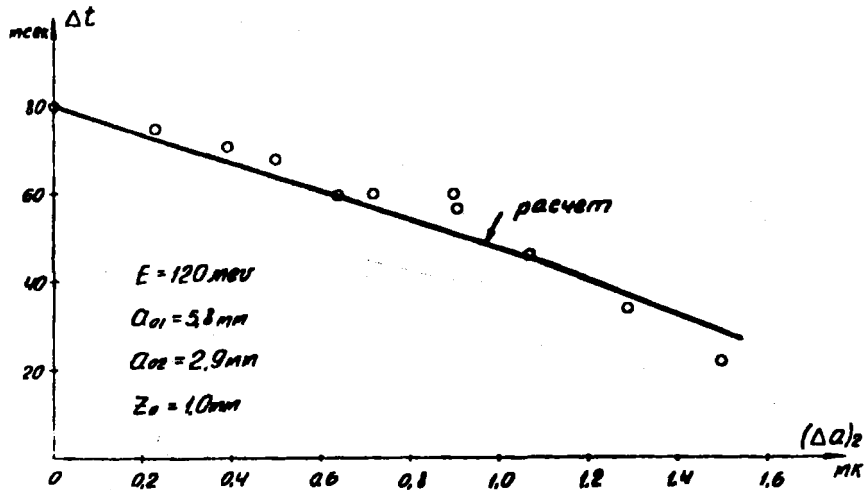


Рис. 4. Время затухания амплитуды частиц от начальной величины $a_{01} = 0,58$ см до величины $z_0 = 0,1$ см, соответствующей положению щели, в зависимости от полуширины ОБА Δa_2 . Равновесная амплитуда ОБА $a_{02} = 0,29$ см, энергия $\omega = 120$ Мэв.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Будкер, А. А. Наумов и др., Труды Международной конференции по ускорителям, стр. 275, Дубна, 1963 г.
2. Г. Н. Кулипанов и др., Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, 1968 г.
3. Э. И. Зинин, Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1968 г.
4. Я. С. Дербенев, Диссертация, Новосибирск, 1968 г.
5. Г. Н. Кулипанов и др., Доклад на настоящей конференции.
6. Б. В. Чириков, Исследования по теории нелинейного резонанса и стохастичности. Диссертация, Новосибирск, 1969 г.
7. K. Symon, A. Sessler, Proc. of the CERN symposium, I, 44 1956.
8. The CESAR Group, CERN report 68-8 1968.

ДИСКУССИЯ

Коломенский: В докладе говорится о трудности проведения экспериментов по продольным эффектам из-за малости отношения радиальных размеров сепаратрисы к радиусу. В этой связи следует заметить, что существуют классы установок типа фазотрона, в которых на начальной стадии ускорения это отношение велико, и продольные эффекты могут проявляться заметным образом.