



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

23

А.Б. Темных

НАБЛЮДЕНИЕ БЕТАТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ  
В ЭФФЕКТАХ ВСТРЕЧИ  
НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-4

ПРЕПРИНТ 84-131



НОВОСИБИРСК



НАБЛЮДЕНИЕ БЕТАТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ В ЭФФЕКТАХ  
ВСТРЕЧИ НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭП-4

А.Б.Темных

А Н Н О Т А Ц И Я

На накопителе ВЭП-4 имеется возможность быстро измерять эффективную площадь области взаимодействия встречных пучков  $S$  и скорость потерь частиц из позитронного сгустка. В работе представлены экспериментальные данные о зависимости  $S$  и скорости потерь частиц из позитронного сгустка от положения рабочей точки накопителя на плоскости  $v_x, v_z$  при различной величине тока в электронном пучке. Анализ этих данных позволил выявить и идентифицировать "машинные" резонансы и резонансы, которые появляются в результате взаимодействия частиц со встречным сгустком.



Электромагнитное взаимодействие встречных пучков (эффекты встречи) в накопителях является главным препятствием для повышения светимости этих установок. Отсутствие удовлетворительно-го описания общей картины эффектов встречи, следуя которому можно было бы с уверенностью предсказать предельные токи и максимальную светимость установки, можно, наверно, объяснить сложностью аналитического описания движения частицы, взаимодействующей со встречным сгустком, и, возможно, недостаточным объемом экспериментальных данных.

В данной работе представлены результаты измерений, которые были сделаны на накопителе ВЭПП-4, и которые отражают картину эффектов встречи на этой установке. Благодаря особенностям детектора МД-1 здесь имеется возможность быстро и с хорошей точностью измерять светимость установки  $L$ . Зная светимость, величину токов в пучках  $I_1$ ,  $I_2$  и частоту обращения  $f_0$ , можно найти эффективную площадь области взаимодействия пучков

$$S = \frac{I_1 I_2}{4\pi e^2 f_0} \frac{1}{L}$$

Кроме этого, имеется возможность быстро измерять скорость потерь частиц, вышедших из пучка за апертуру накопителя.

В данной работе представлены графики зависимости эффективной площади области взаимодействия встречных пучков и скорости потерь частиц от положения рабочей точки накопителя на плоскости бетатронных частот  $\nu_x$ ,  $\nu_y$  при различной величине токов. При этом выявлены и идентифицированы "машинные" резонансы, т.е. резонансы, которые проявляются в движении частиц в случае, когда эффектами встречи можно пренебречь, а также резонансы, которые появляются благодаря электромагнитному взаимодействию между встречными пучками.

В первой части работы описана методика проведения измерений, во второй представлены результаты, в третьей части работы делаются некоторые выводы.



## I. МЕТОДИКА

На рис. I приведена схема экспериментального промежутка накопителя ВЭПП-4. Детектор МД-1 /1/, который установлен на накопителе ВЭПП-4, имеет вертикальное, по отношению к плоскости орбиты частиц в накопителе, магнитное поле. Такое направление магнитного поля детектора позволяет использовать для измерения абсолютной светимости процесс однократного тормозного излучения  $e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma$ . Этот процесс имеет большое эффективное сечение, поэтому время, необходимое для точного измерения светимости, сравнительно мало. Так при светимости  $L = 3 \cdot 10^{30}$  I/cm<sup>2</sup>сек статистическая точность при времени измерения  $T = 100$  мс составляет  $\frac{\Delta L}{L} \sim 2.5 \cdot 10^{-2}$ .

Как было отмечено во введении, зная светимость, токи в пучках и частоту обращения, можно вычислить эффективную площадь области взаимодействия встречных пучков  $S = \frac{J_+ J_-}{4\pi c^2 f_0 L}$ . Во время измерений, которые будут описаны ниже, радиальный размер пучков не изменялся, поэтому увеличение  $S$  связано с увеличением вертикального размера обоих, в случае машинного резонанса, или более слабого пучка в случае пучкового резонанса.

В системе регистрации, которая используется на ВЭПП-4, имеются счетчики, регистрирующие тормозные  $\gamma$ -кванты, родившиеся в результате взаимодействия частиц пучков с атомами остаточного газа или со стенками вакуумной камеры в экспериментальном промежутке накопителя. В процессе работы было замечено, что уменьшение времени жизни позитронного тока из-за выхода частиц за апертуру накопителя по радиусу или по вертикали всегда сопровождается увеличением скорости счета тормозных фотонов. Это означает, что место, определяющее окрестности накопителя, находится в пределах прямой видимости счетчика, фиксирующего тормозные фотоны со стороны позитронного сгустка.

По этой причине скорость потерь частиц из пучка и скорость счета тормозных фотонов оказались взаимно связаны. Поэтому в дальнейшем будет говориться не о скорости счета тормозных фотонов, а о скорости потерь частиц, вышедших из пучка за апертуру накопителя.

В экспериментах, результаты которых будут представлены ниже, измерялась зависимость эффективной площади области взаимодействия пучков  $S$  и зависимость скорости потерь частиц из позитронного сгустка от положения рабочей точки накопителя на частотной плоскости  $\nu_x, \nu_z$ . В процессе измерений (в дальнейшем этот процесс мы будем называть сканированием) рабочей точка "заметала" в плоскости  $\nu_x, \nu_z$  квадрат со сторонами  $\Delta \nu_x \times \Delta \nu_z = 0.064 \times 0.064$ . Шаг по  $\nu_x, \nu_z$  составлял  $|\delta \nu_x| = |\delta \nu_z| = 10^{-3}$ . После каждого шага делалось измерение светимости (время набора статистики в одной точке составляло  $T = 100$  мс), скорости счета тормозных фотонов  $N_p$ , токов в электронном  $J(-)$  и позитронном  $J(+)$  пучках, вычислялись величины  $S = \frac{J_+ J_-}{4\pi c^2 f_0 L}$ ,  $F = \frac{N_p}{J_+}$ , которые запоминались для последующей обработки и вывода. Процесс сканирования был полностью автоматизирован и продолжался 15 мин.

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ

I. "Машинные" резонансы. Ведущее магнитное поле любого накопителя имеет нелинейные компоненты, которые в конечном счете приводят к появлению "машинных" резонансов.

На рис. 2 изображена частотная плоскость  $\nu_x, \nu_z$  со всеми резонансами, исключая синхробетатронные, до пятого порядка включительно ( $m \nu_x + n \nu_z = k, |m| + |n| \leq 5, m, n$  и  $k$  - целые числа), которые в принципе могли бы проявиться в наших экспериментах. На этом рисунке квадратом ограничена область, которую "заметала" рабочая точка в процессе сканирования, а также отмечено обычное положение рабочей точки накопителя ВЭПП-4. Для изучения машинных резонансов было проведено сканирование с "микротоками", т.е. токи в пучках были настолько малы, что эффектами встречи можно было заведомо пренебречь. Основные параметры накопителя во время этих измерений приведены в таблице I.

На рис. 3 представлены результаты сканирования. Здесь по осям, лежащим в горизонтальной плоскости отложены дробные части бетатронных частот  $[\nu_x], [\nu_z]$ . На рис. 3а по вертикальной оси отложена эффективная площадь области взаимодействия пучков  $S$  в от. ед., на рис. 3б скорость счета тормозных фото-



нов, нормированная на ток позитронного пучка  $F = \frac{N_p}{J_m}$  в ед.  $\frac{1}{mA}$ . Как было отмечено выше, эта величина отражает скорость потерь частиц из позитронного пучка.

На рис.3а видны разностные резонансы связи:

$$\text{линейный } \nu_x - \nu_z = -1$$

$$\text{4-го порядка } 3\nu_x - \nu_z = 16.$$

Линейный резонанс  $\nu_x - \nu_z = -1$  связан с возмущением ведущего магнитного поля типа  $\delta H_x \sim x$ ,  $\delta H_z \sim z$ . Источником подобного возмущения может быть, например, разворот квадрупольных линз вокруг продольной оси. Появление резонанса 4-го порядка  $3\nu_x - \nu_z = 16$  связано с присутствием на равновесной орбите компонент магнитного поля  $\delta H_x \sim xz^2$ ,  $\delta H_z \sim z^3$ . Вопрос об источнике и величине этих полей требует отдельного рассмотрения и в данной работе обсуждаться не будет.

На рис.3б, где приведена зависимость скорости потерь частиц из позитронного пучка от положения рабочей точки, видны одномерный резонанс 5-го порядка  $5\nu_z = 48$  и суммовый резонанс связи  $4\nu_z + \nu_x = 47$ . Первый связан с возмущением магнитного поля типа  $\delta H_x \sim z^4$ , второй -  $\delta H_x \sim xz^3$ ,  $\delta H_z \sim z^4$ .

Таким образом видно, что в районе рабочей точки ВЭПП-4 проявляются все "машинные" резонансы до 5-го порядка включительно. Разностные резонансы связи проявляются как увеличение вертикального размера пучков, при этом время жизни не уменьшается. Одномерный резонанс  $5\nu_z = 48$  и суммовый резонанс  $4\nu_z + \nu_x = 47$  проявляются как увеличение скорости потерь частиц, вышедших за апертуру накопителя. При этом вертикальный размер пучков не изменяется.

2. Эффекты встречи. На накопителе ВЭПП-4, где имеется только одно место встречи, в движении частиц, взаимодействующих со встречным сгустком, могут проявляться резонансы типа:  $2m\nu_x + 2n\nu_z = k$ , где  $m, n, k$  - любые целые числа,  $p = |2m| + |2n|$  - порядок резонанса. Такое правило отбора обусловлено симметрией электромагнитного потенциала встречного пучка. На рис.4 представлены все пучковые резонансы до 10-го порядка, которые лежат в районе рабочей точки ВЭПП-4. Как и в предыдущем случае, здесь квадратом отмечена область, которую

"залитала" рабочая точка в процессе сканирования, а также отмечено обычное положение рабочей точки. Результаты измерений при средней величине электронного тока и при токе в электронном пучке близком к предельному представлены соответственно на рис.5 и 6.

Средние токи. На рис.5 представлены результаты измерений при токах  $J(+)=1.2\text{ mA}$ ,  $J(-)=5.8\text{ mA}$ . Такое соотношение токов было выбрано из условия, во-первых, чтобы эффекты встречи типа "flip-flop" не искажали картину резонансов, во-вторых чтобы была возможность сравнивать результаты этих измерений с результатами численного моделирования и аналитических расчетов, которые обычно делаются в приближении "сильный-слабый" пучок. Величины параметров  $f_x, f_z$ , которые можно оценить, зная радиальный размер пучков, светимость и токи, в нашем случае были:  $f_x \sim 0.009$ ,  $f_z \sim 0.035$ .

При сравнении рис.5а и 3а видно, что, во-первых, увеличилась сила резонанса  $3\nu_x - \nu_z = 16$ . Это можно объяснить результатом сложения резонансных гармоник от нелинейных компонент ведущего магнитного поля с резонансной гармоникой от встречного пучка, которая соответствует резонансу 8-го порядка  $6\nu_x - 2\nu_z = 32$ . Во-вторых появился разностный резонанс 6-го порядка  $4\nu_x - 2\nu_z = 15$ , которого не было на рис.2а. Увеличение вертикального размера слабого пучка на этом резонансе составляет  $\sim 30\%$ . Резонансы 10-го порядка  $8\nu_x - 2\nu_z = 49$  и  $6\nu_x - 4\nu_z = 13$  (см. рис.4) не проявляются. Таким образом из разностных резонансов связи при средних токах работают все резонансы до 8-го порядка.

Заметим, что на рис.5б, где приведена зависимость скорости потерь частиц из позитронного пучка, ни один из разностных резонансов в явном виде не проявляется. При сравнении рис.5б, в и 3б, где приведены зависимости скорости потерь частиц из позитронного пучка в случае средних токов и "микротоков", соответственно, видно увеличение скорости потерь частиц на "машинных" резонансах  $\nu_x + 4\nu_z = 47$  и  $5\nu_z = 48$ , а так же появление новых, одномерных резонансов  $\nu_z = 9.571$ ,  $\nu_x = 8.555$ ,  $\nu_x = 8.571$ . Увеличение скорости потерь частиц на "машинных" резонансах можно объяснить сложением резонансных гармоник от встречного пучка, которые возбуждают резонансы  $2\nu_x + 8\nu_z = 94$



и  $10 \nu_2 = 96$  с соответствующими гармониками от линейных компонент ведущего магнитного поля. Что касается появления новых одномерных резонансов, то можно было бы предположить, что они чисто пучковые. Если это так, то должны были бы проявиться и пучковые резонансы более низкого порядка. Однако их нет. Это отражено в таблице 2. Поэтому можно сделать вывод, что одномерные резонансы  $\nu_x = 8.571$ ,  $\nu_x = 8.555$ ,  $\nu_x = 9.571$  проявились только благодаря сложению резонансных гармоник от встречного пучка с резонансными гармониками от нелинейных компонент ведущего магнитного поля накопителя.

Заметим также, что скорость потерь частиц резко увеличивается в случае, когда рабочая точка лежит вблизи области пересечения разностных резонансов связи с одномерными или с суммовыми резонансами (см. рис.5в). Например:

а) разностного резонанса связи  $\nu_x - \nu_2 = -1$  с резонансами  $\nu_x = 8.571$ ,  $\nu_2 = 9.571$ ;

б) резонанса  $3 \nu_x - \nu_2 = 16$  с резонансами  $\nu_x = 9.6$ ,  $\nu_x + 4 \nu_2 = 47$ ;

в) резонанса  $4 \nu_x - 2 \nu_2 = 15$  с резонансами  $\nu_x = 9.6$ ,  $\nu_x + 4 \nu_2 = 47$ .

Экспериментальные данные, которые обсуждались выше, доказывают, что во-первых в отдельных случаях, при средних токах, движение частиц взаимодействующих со встречным сгустком, можно действительно описывать в приближении изолированного резонанса. Во-вторых, при численном моделировании или аналитическом рассмотрении эффектов, связанных с электромагнитным взаимодействием встречных пучков, необходимо учитывать нелинейные компоненты высокого порядка ведущего магнитного поля накопителя, иначе полученные результаты во многих случаях будут заведомо неправильно описывать реальное движение частиц, взаимодействующих со встречным сгустком.

Аналитическое рассмотрение вопроса о сложении резонансных гармоник от пучка с резонансными гармониками от нелинейных компонент ведущего магнитного поля вполне возможно и будет, вероятно, сделано в последующих работах.

Большие токи. На рис.6а,б представлены результаты измерений при токах  $J(+)=6.2 \text{ ма}$ ,  $J(-)=10.2 \text{ ма}$ . Ток в электронном пучке близок к предельному. Параметры  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ , которые можно оценить были:  $\xi_1 \sim 0.015$ ,  $\xi_2 \sim 0.06$ .

При сравнении рис.6а и 5а видно, что, во-первых, выросли ширины всех резонансов, во-вторых, рельеф поверхности стал более сглаженным. Возможно, что это сглаживание поверхности связано уже с частичным перекрытием резонансов. На рис.6б, где представлена зависимость скорости потерь частиц от рабочей точки, уже не видно четко выраженных резонансов, как было при средних токах (см. рис.5б). Области с плохим временем жизни оказываются в основном перекрытыми. Вероятно, это также связано с перекрытием резонансов. Поэтому описание движения частиц в приближении изолированного резонанса в случае, когда величины токов близки к предельным, будет неверным.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении суммируем выводы, которые были сделаны выше.

1. Сканирование с "микротоками" показало, что проявляются все "машинные" резонансы до 5-го порядка включительно. Разностные резонансы связи проявляются как увеличение вертикального размера пучков. Суммовые и одномерные резонансы нечетного порядка проявляются как увеличение скорости потерь частиц из пучка.

2. При средних токах, во-первых, в районе рабочей точки ВЭП-4 появляется сильный разностный резонанс  $4 \nu_x - 2 \nu_2 = 15$ , который приводит к заметному увеличению вертикального размера слабого пучка. Во-вторых увеличивается скорость потерь частиц из пучка на "машинных" резонансах, а также благодаря сложению резонансных гармоник от нелинейных компонент ведущего магнитного поля с резонансными гармониками от пучка появляются новые одномерные резонансы.

Скорость потерь частиц из пучка сильно увеличивается в случае когда рабочая точка накопителя лежит вблизи пересечения разностного резонанса связи с одномерными или с суммовыми резонансами.



При аналитическом рассмотрении движения частиц в накопителе при средних токах, в отдельных случаях возможно приближение изолированного резонанса.

3. Сканирование при токах, близких к предельным показало, что ограничение на ток связано с перекрытием резонансов. Причем сила этих резонансов определяется не только резонансными гармониками нелинейного электромагнитного поля встречного пучка, но и в большой степени нелинейными компонентами ведущего магнитного поля накопителя.

В заключении автор выражает искреннюю благодарность С.И.Мишневу, Г.М.Тумайкину, А.А.Жоленцу за большую помощь в проведении данной работы и полезные обсуждения.

#### Литература

- I. *S. E. Barw et. al., Proc. of the Int. Conf. on Instr. for colliding beam physics. (SLAC, Stanford, 1982) p. 241*



Таблица 1

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-4

Энергия	$E = 4.7 \text{ ГэВ}$
Бета-функции в месте встречи	$\beta_x = 0.3 \text{ м}$ $\beta_z = 0.19 \text{ м}$
Дисперсионная функция в месте встречи	$\eta_x \sim 0 \text{ м}$
Размеры невозмущенных пучков в месте встречи	$b_x = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ $b_z = 0.14 \cdot 10^{-4} \text{ м}$
Частота обращения	$f_0 = 818.780 \text{ кГц}$
Частота синхротронных колебаний	$\nu_s = 0.02$
Хроматизм	$C_x = 1$ $C_z = 1$
Энергетический разброс частиц в пучке	$\frac{\Delta E}{E} \approx 1.0 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент уплотнения орбит	$\alpha = 0.016$
Время радиационного затухания по вертикали	$\tau_z = 6 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$
Отношение безразмерных декрементов радиационного затухания	$\frac{C_x}{C_z} \approx 1.$

	Резонанс	"Машинные" до 10-го порядка	Пучковый	Примечание
$\nu_x$	8.571	$7 \nu_x = 60$	$14 \nu_x = 120$	есть
	8.562	-	$16 \nu_x = 137$	нет
	8.555	$9 \nu_x = 77$	$18 \nu_x = 154$	есть
$\nu_z$	9.583	-	$12 \nu_z = 115$	нет
	9.571	$7 \nu_z = 67$	$14 \nu_z = 134$	есть



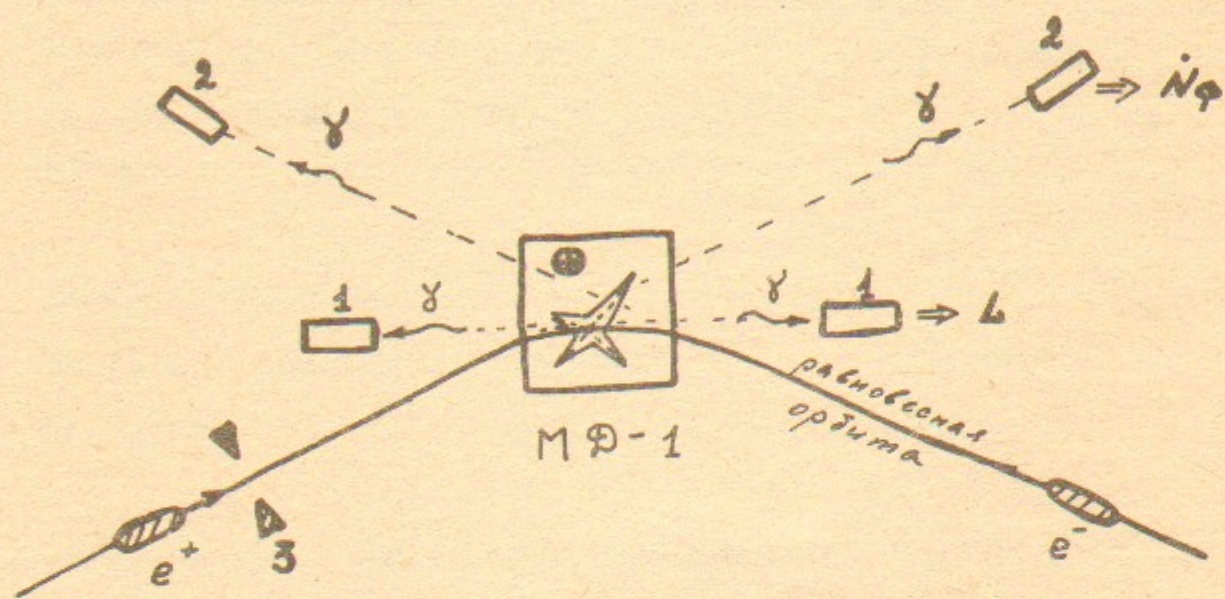


Рис.1. Схема экспериментального промежутка накопителя ВЭПП-4.

Здесь: ж - место встречи;

+ - направление магнитного поля в детекторе МД-1;

1 - мониторы светимости;

2 - счетчики, регистрирующие тормозные фотоны;

3 - место, определяющее акцептанс накопителя.

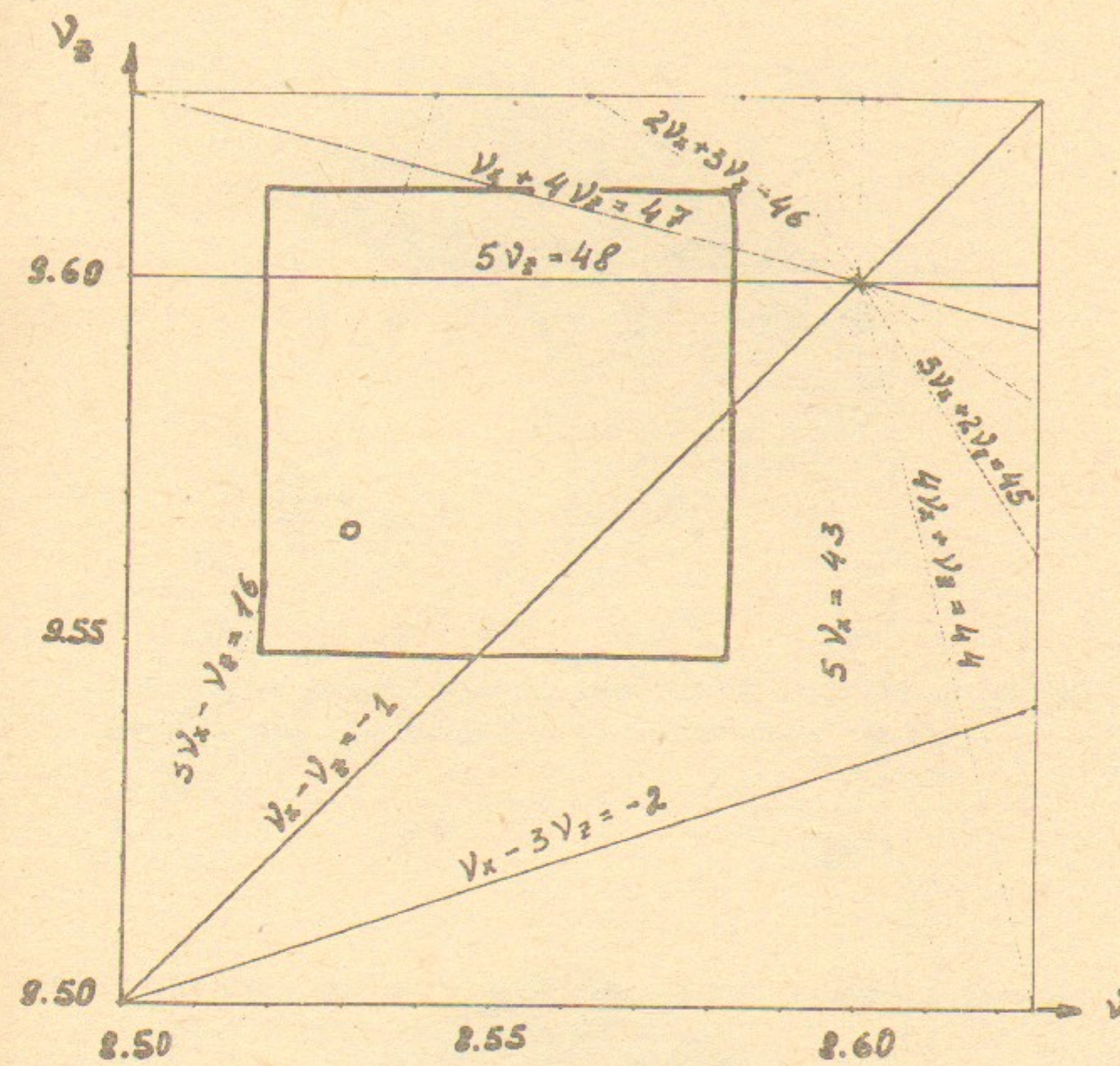


Рис.2. "Машинные" резонансы.

o - рабочая точка ВЭПП-4.



Рис.3. Результаты сканирования при "микротоках".  
 $J(+)=0.72\text{ ма}$ ,  $J(-)=1.3\text{ ма}$ .

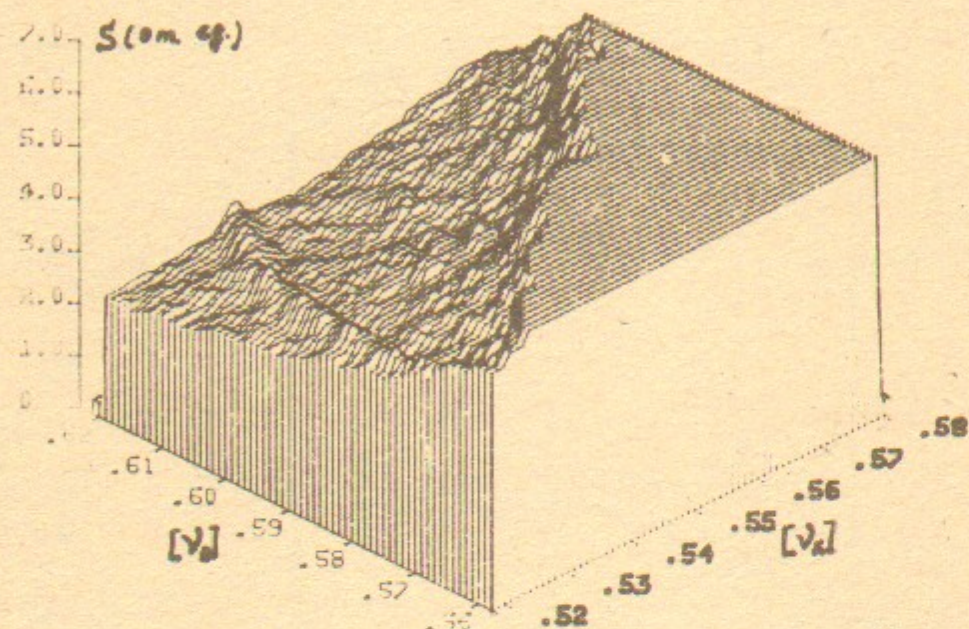


Рис.3а. Зависимость эффективной площади области взаимодействия встречных пучков от положения рабочей точки накопителя.

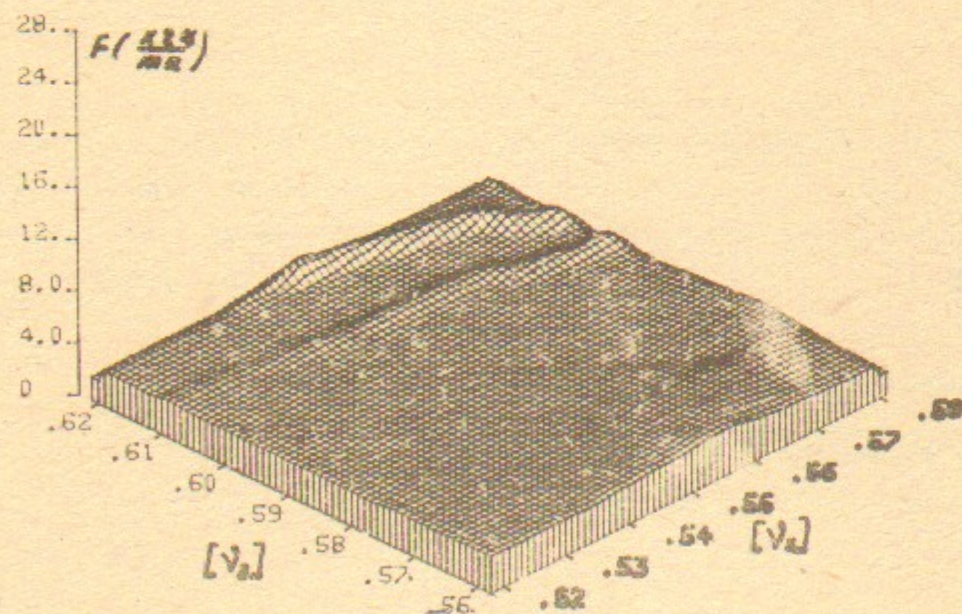


Рис.3б. Зависимость скорости потерь частиц из позитронного пучка от положения рабочей точки.

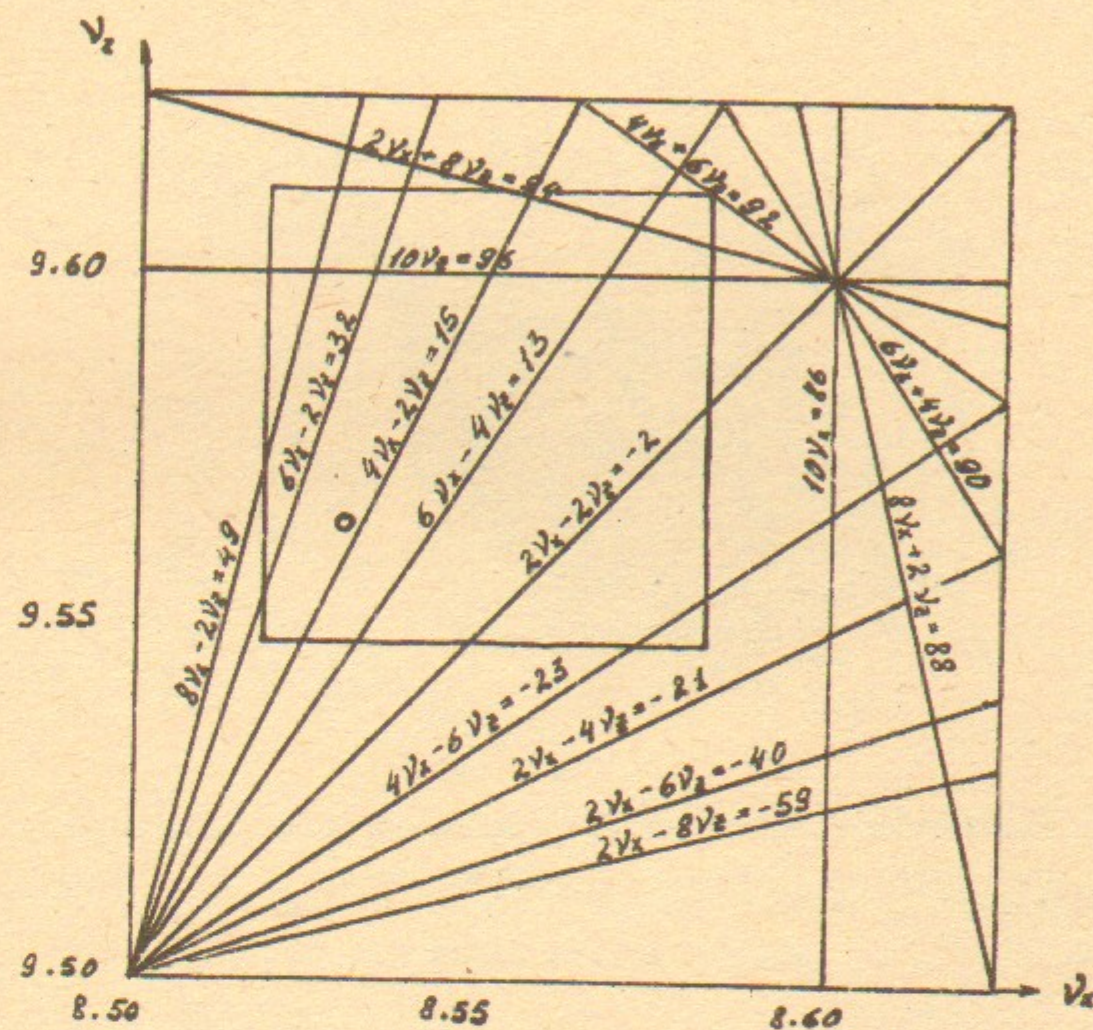


Рис.4. Пучковые резонансы до 10-го порядка, лежащие в районе рабочей точки накопителя ВЭП-4.



Рис.5. Результаты сканирования при средних токах  $J(+)=1.2\text{ма}$   
 $J(-)=5.8\text{ма}$  ( $\xi_1=0.009$ ,  $\xi_2=0.035$ ).

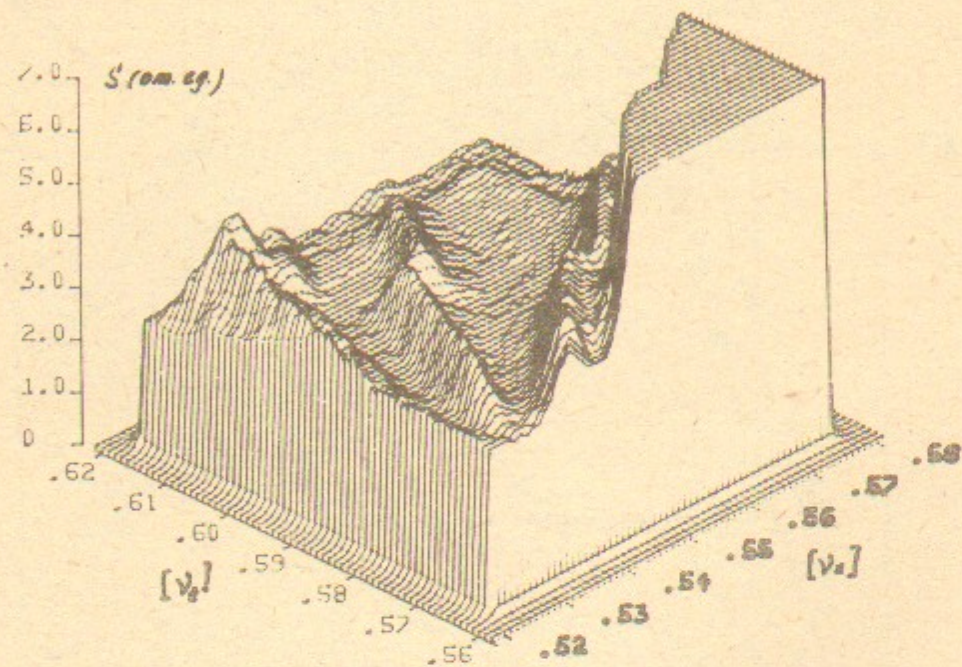


Рис.5а. Зависимость эффективной площади области взаимодействия встречных пучков от рабочей точки.

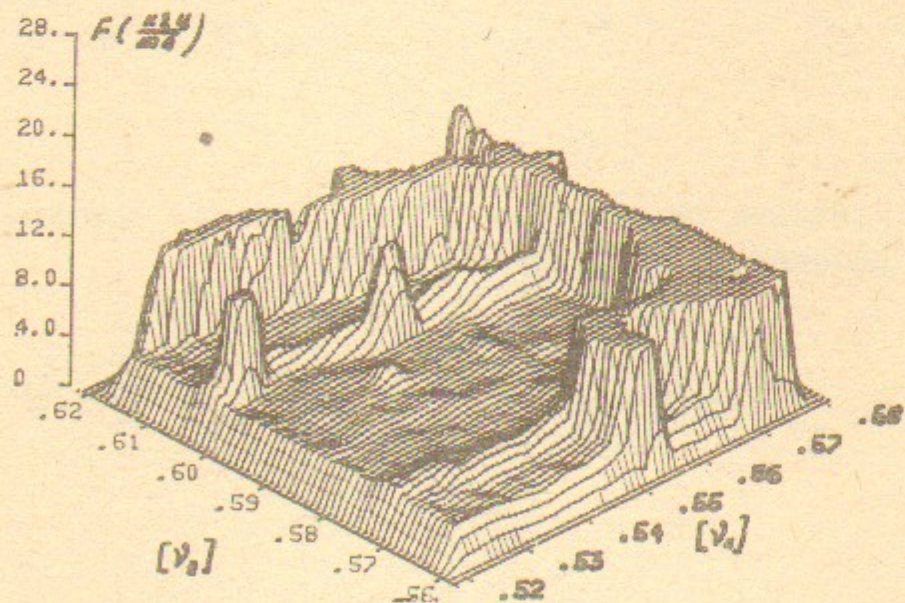


Рис.5б. Зависимость скорости потерь частиц из позитронного пучка от положения рабочей точки. Максимальный уровень  $F$  ограничен величиной  $12 \frac{\text{кВт}}{\text{ма}}$ .

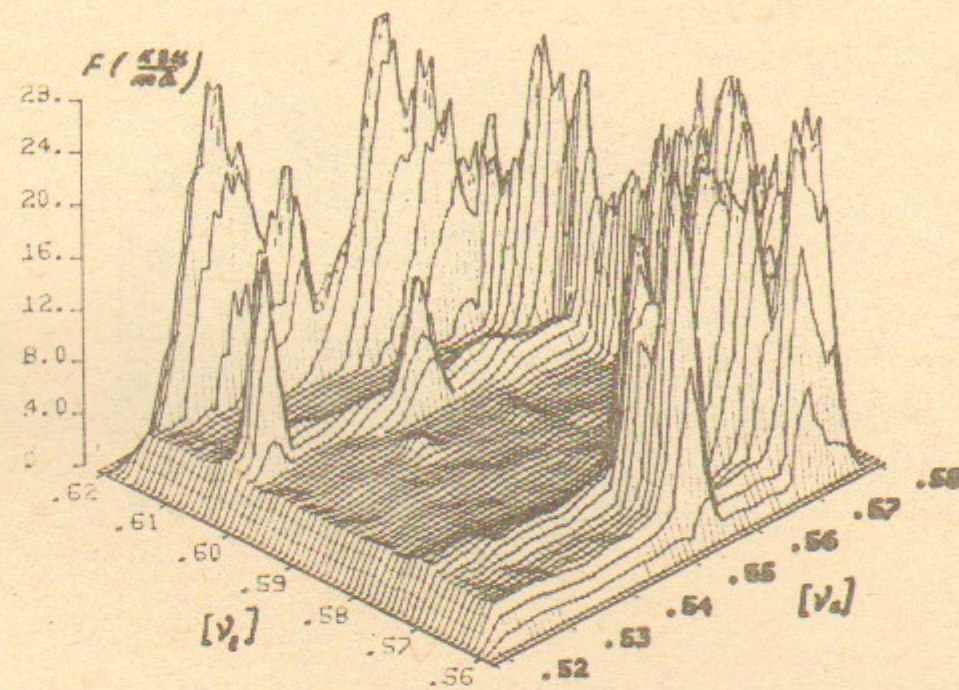


Рис.5в. Зависимость скорости потерь частиц из позитронного пучка от положения рабочей точки при токе  $J_0=5.8\text{ма}$ .



Рис.6. Результаты сканирования при больших токах  $J (+) = 6.2 \text{ ма}$ ,  $J (-) = 10.2 \text{ ма}$  ( $\xi_2 \sim 0.015$ ,  $\xi_2 \sim 0.06$ ).

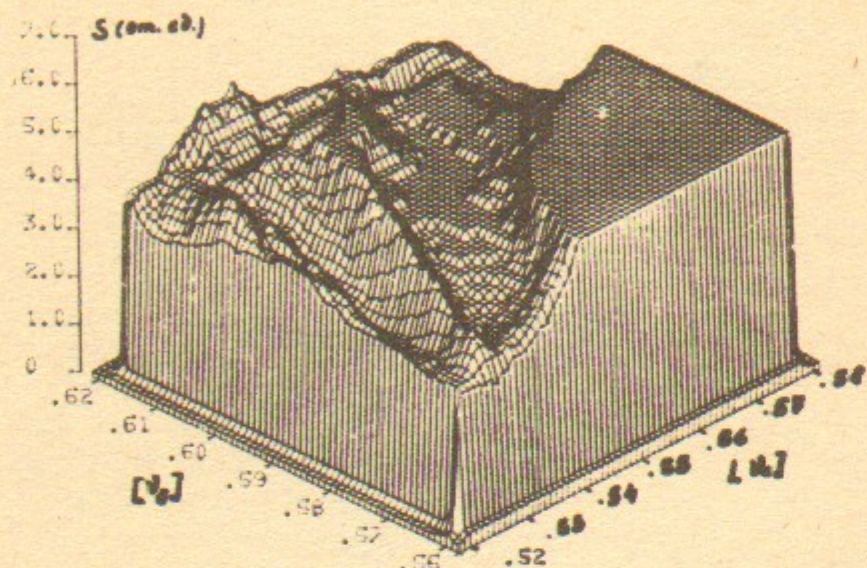


Рис.6а. Зависимость эффективной площади области взаимодействия встречных пучков от положения рабочей точки.

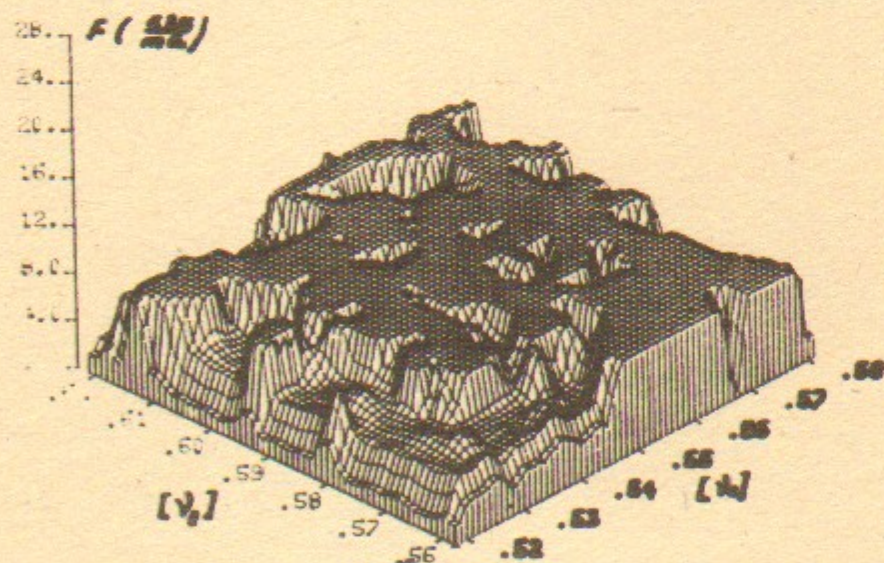


Рис.6б. Зависимость скорости потерь частиц из позитронного пучка от положения рабочей точки. Максимальный уровень  $F$  ограничен величиной  $8 \text{ кч/ма}$ .

А.Б.Темных

НАБЛЮДЕНИЕ БЕТАТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ В ЭФФЕКТАХ  
ВСТРЕЧИ НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-4

Препринт  
№ 84-131

Работа поступила - 26 сентября 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов  
Подписано к печати 12.X-1984 г. МН 06173  
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл. 1,7 печ.л., 1,4 учетно-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 131.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90