

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

И.Б.Вассерман, Ф.М.Израи́лев, И.А.Кооп,  
А.Н.Скринский, Г.М.Тума́йкин

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ  
ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ  
ТОКОВ В УСТАНОВКАХ СО ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ

ПРЕПРИНТ 81 - 09



НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ  
ПЛОТНОСТИ ТОКОВ В УСТАНОВКАХ СО ВСТРЕЧНЫМИ  
ПУЧКАМИ

И.Б.Вассерман, Ф.М.Израйлев, И.А.Кооп, А.Н.Скринский,  
Г.М.Тумайкин

А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждаются возможности увеличения предельных токов, ограниченных эффектами встречи в установках со встречными пучками. Используются как экспериментальные данные, полученные на ВЭШ-2М, так и результаты численного моделирования.

Изучение эффектов встречи с целью увеличения светимости установок со встречными пучками имеет большое значение как для повышения эффективности уже работающих установок, так и при проектировании новых. Обычно в качестве характеристики предельной плотности тока, определяющей светимость, используется параметр  $\xi_c$ . С целью изучения возможностей увеличения значения  $\xi_c$  на установке ВЭП-2М был проведен цикл специальных экспериментов. Во всех экспериментах использовалась схема "сильный-слабый" пучок. Как показывает опыт, такой режим по сравнению со схемой "сильный-сильный" пучок практически не меняет характер зависимости некогерентных эффектов встречи от различных параметров (см., например, /1/), но упрощает проведение экспериментов и облегчает их истолкование. В настоящей работе приводятся также некоторые результаты численного моделирования эффектов встречи на ЭВМ. С помощью численного моделирования на ЭВМ рассматривалась возможность работы на основном резонансе связи при равных  $\beta$ -функциях в месте встречи, а также влияние различных модуляций на величину  $\xi_c$ .

#### I. Зависимость величины $\xi_c$ от близости к целому резонансу

Предельная светимость установок со встречными пучками определяется, как известно, произведением  $\xi_{xc} \cdot \xi_{zc}$ . Численное моделирование /2/ показывает, что величина  $\xi_c$  резко возрастает вблизи целого резонанса, условие которого имеет вид:  $\mu/\nu = k$ . Здесь  $\mu$  - набег бетатронной фазы между местами встречи ( $\mu = \frac{2\pi\nu}{m_0}$ ;  $\nu$  - бетатронная частота,  $m_0$  - число мест встречи на обороте), а  $k$  - любое целое число. Работа вблизи целого резонанса (для зарядов разного знака - выше, и зарядов одного знака - ниже резонанса) предпочтительна еще и потому, что в этой области бетатронных частот отсутствуют нелинейные резонансы низких гармоник. На накопителе ВЭП-2М имеется возможность менять места встречи и, тем самым, менять относительный характер вертикального и радиального движения. В данном случае существенным оказывается то, по какому направлению движение является определяющим, т.е. по какому направле-

нию раньше достигается критическое значение  $\xi_x, \xi_z$ .

I.1. Экспериментальная зависимость величины  $\xi_c$  от близости рабочей точки к целому резонансу для  $\beta_x/\beta_z \approx 15$  и  $\rho_x/\rho_z \approx 6.7$  приведена на рис. I. (кривая 1). Эксперимент показывает, что в данном случае определяющим является радиальное движение, несмотря на то, что  $\xi_x/\xi_z \approx 0.4$ . Это может быть связано как с наличием дисперсионной функции  $h_x$  в месте встречи, так и с существенно различным характером нелинейности по обеим направлениям. Кривая 2 показывает зависимость сдвига частоты малых бетатронных колебаний  $\Delta\nu_c$ , пересчитанной по данным кривой 1. Отметим, что при приближении к целому резонансу возрастает не только величина  $\xi_c$  но и  $\Delta\nu_c$ .

I.2. Результаты аналогичного эксперимента для случая, когда условия движения по  $x$  и  $z$  одинаковы, ( $\xi_x = \xi_z$ ), представлены на рис. I (кривые 3 и 4). В данном случае использовалось место встречи с равными  $\beta$ -функциями при условии  $\nu_x = \nu_z$  (круглый пучок:  $\sigma_x = \sigma_z$ ). Величина связи поддерживалась в пределах  $|\Delta\nu_{min}| \leq 3 \cdot 10^{-3}$ . Поперечное движение в этом случае является практически одномерным [3]. Зависимость от близости к целому резонансу качественно имеет такой же характер, как и в разделе I.1. Малая величина  $\xi_c$ , полученная в этом эксперименте, может объясняться несколькими факторами. Один из них связан с модуляцией из-за радиальной дисперсионной функции в месте встречи, а также из-за зависимости  $\beta$ -функции от азимута [2, 4]. Второй фактор — малая величина вертикальной апертуры (см. § 2).

I.3. Существенно другой оказывается зависимость  $\xi_c = f(\nu_z)$  когда определяющим является движение по вертикали ( $\xi_z \gg \xi_x$ ). При этом, по-видимому, начинают работать многочисленные резонансы связи  $m\nu_x + n\nu_z = k$  и зависимость  $\xi_c = f(\nu)$  становится нерегулярной даже в той области, где отсутствуют мощные одномерные резонансы. В этом случае становится трудным использовать эффект близости к резонансу. Сравнивая варианты, рассмотренные в п.п. I.1 и I.2 можно прийти к выводу, что для  $\sigma_x \gg \sigma_z$  более благоприятен вариант, при котором определяющим является движение по горизонтали. При этом оказывается возможным использовать эффект близости к целому резонансу и, как по-

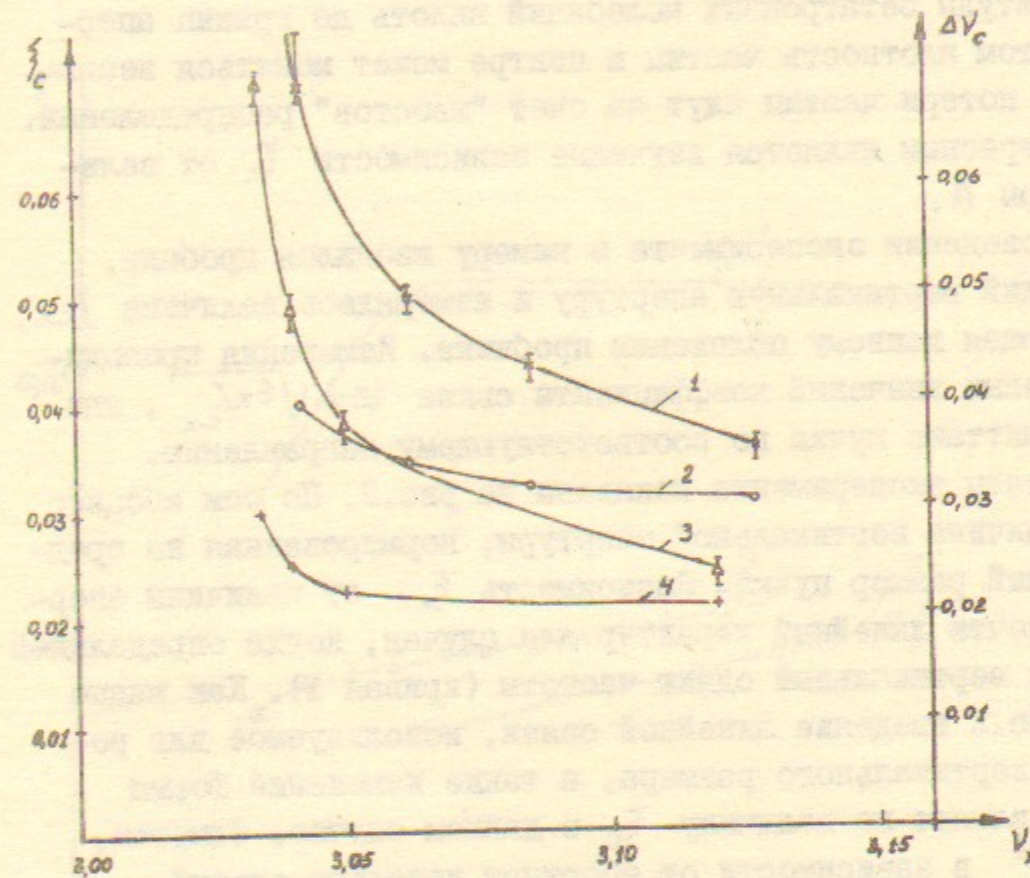


Рис. I. Зависимость  $\xi_c$  и  $\Delta\nu_c$  от близости к целому резонансу для энергии  $E = 510$  МэВ и двух мест встречи:  $m_0 = 2$ .  
Кривые 1 ( $\xi_c$ ) и 2 ( $\Delta\nu_c$ ):  $\beta_x = 40$  см;  $\beta_z = 6$  см;  
 $h_x = 40$  см;  $\partial\beta_x/\partial S = 0$ .  
Кривые 3 ( $\xi_c$ ) и 4 ( $\Delta\nu_c$ ):  $\beta_x = \beta_z = 350$  см;  
 $h_x = 60$  см;  $\partial\beta_x/\partial S = 40$ .

казывают экспериментальные результаты на ВЭП-2М, достигается максимальная величина  $\xi_c$ .

## 2. Зависимость величины $\xi_c$ от апертуры и формы пучка.

Потери частиц при взаимодействии пучков связаны с возрастанием амплитуды бетатронных колебаний вплоть до границ апертуры. При этом плотность частиц в центре может меняться незначительно, а потери частиц идут за счет "хвостов" распределения. Поэтому интересным является изучение зависимости  $\xi_c$  от величины апертуры  $A$ .

При проведении эксперимента в камеру вводился пробник, ограничивающий вертикальную апертуру и измерялась величина  $\xi_{cz}$ , соответствующая данному положению пробника. Измерения проводились для разных значений коэффициента связи  $\varkappa = \sqrt{\varepsilon_z/\varepsilon_x}$ , где  $\varepsilon_{x,z}$  - эмиттанс пучка по соответствующему направлению.

Результаты эксперимента показаны на рис.2. По оси абсцисс отложена величина вертикальной апертуры, нормированная на среднеквадратичный размер пучка. Зависимость  $\xi_{cz}$  от величины апертуры имеет почти линейный характер для случая, когда определяющим является вертикальный сдвиг частоты (кривая 1). Как видно из данных рис.2 введение линейной связи, используемое для регулирования вертикального размера, а также изменение формы пучка слабо влияют на величину  $\xi_c$  в данном случае. Отметим, что рост  $\xi_c$  в зависимости от апертуры довольно слабый.

В случае, когда использовались места встречи, где определяющим является горизонтальный сдвиг частоты, зависимость от вертикальной апертуры носит, как и следует ожидать, другой характер (кривая 2). Имеется значительная область апертуры, не оказывающая влияние на время жизни "слабого" пучка. В то же время, при  $A/\sigma_z \leq 50$  величина  $\xi_{cz}$  резко уменьшается. Это означает, что диффузия частиц по вертикальному направлению ограничена ("хвосты" распределения обрезаны) и время жизни определяется уходом частиц по радиусу.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что эффекты встречи накладывают дополнительные требования к величине апертуры, недостаточная величина которой может заметно ограничивать предельный ток.

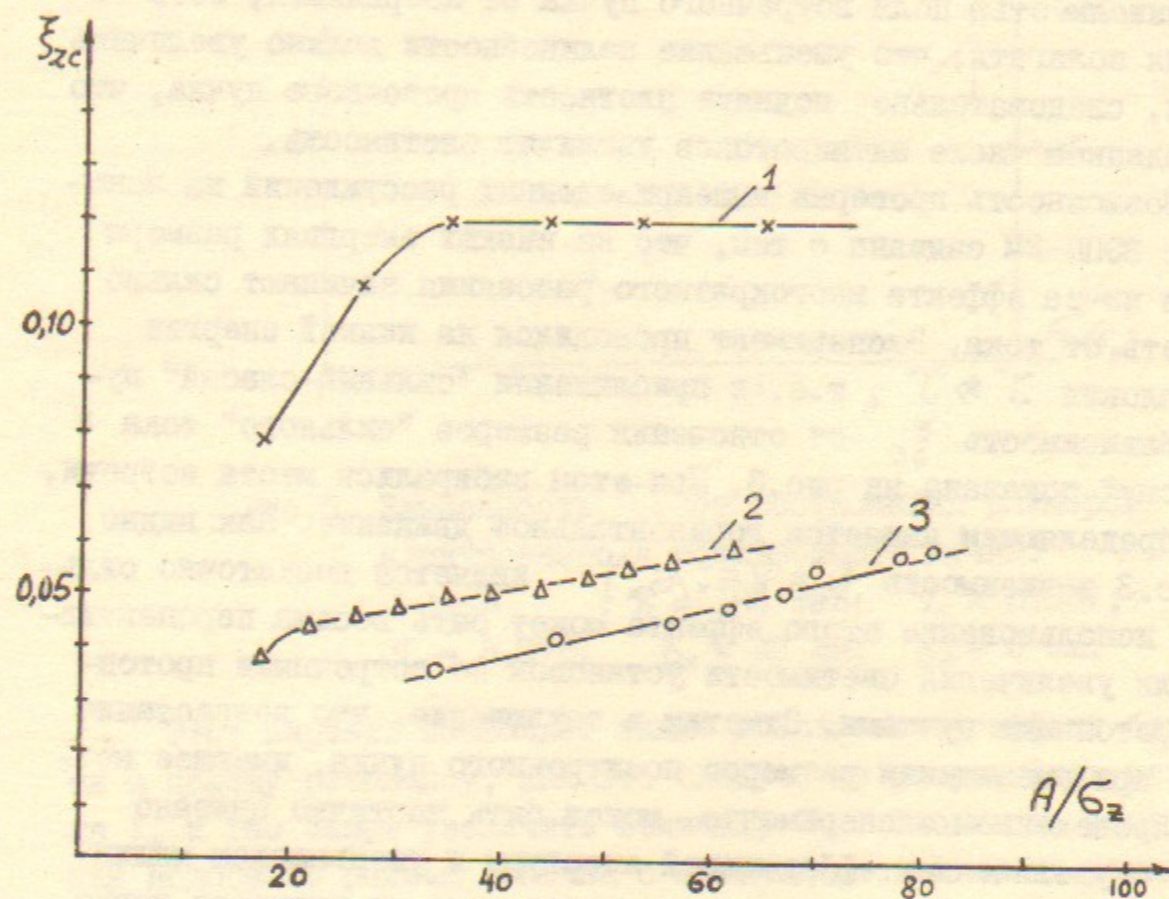


Рис.2. Зависимость  $\xi_{cz}$  от относительной апертуры.

$E = 510$  МэВ;  $\gamma_x = 3,081$ ;  $\gamma_z = 3,105$   
 x -  $\beta_x = 40$  см,  $\beta_z = 6$  см,  $\varkappa = 0,15$   
 o -  $\beta_x = 25$  см,  $\beta_z = 150$  см,  $\varkappa = 0,12$   
 Δ -  $\beta_x = 25$  см,  $\beta_z = 150$  см,  $\varkappa = 0,16$

### 3. Зависимость от соотношения размеров встречных пучков

Интерес к этому вопросу возник в связи с разработкой проектов встречных протон-антипротонных пучков. Если увеличить поперечные размеры протонного сгустка по сравнению с антипротонным, то антипротоны оказываются, в основном, в линейной части поля протонного пучка. Поскольку эффекты встречи связаны с нелинейной зависимостью поля встречного пучка от координаты, есть основания полагать, что уменьшение нелинейности должно увеличить  $\xi_c$  и, следовательно, поднять плотность протонного пучка, что при заданном числе антипротонов увеличит светимость.

Возможность проверки вышеприведенных рассуждений на накопителе ВЭП-2М связана с тем, что на низких энергиях размеры пучков из-за эффекта многократного рассеяния начинают сильно зависеть от тока. Эксперимент проводился на низкой энергии при условии  $J^- \gg J^+$ , т.е. в приближении "сильный-слабый" пучок. Зависимость  $\xi_c$  от отношения размеров "сильного" тока к "слабому" показана на рис.3. При этом выбирались места встречи, где определяющим является горизонтальное движение. Как видно из рис.3 зависимость  $\xi_c = f(\sigma_x^-/\sigma_x^+)$  является достаточно сильной и использование этого эффекта может быть весьма перспективным для увеличения светимости установок со встречными протон-антипротонными пучками. Отметим в заключение, что возрастание  $\xi_c$  при уменьшении размеров позитронного пучка, имеющее место в проведенном эксперименте, может быть частично связано также с увеличением эффективной апертуры и уменьшением машинных нелинейностей, величина которых зависит от размеров пучка.

### 4. Работа на основном резонансе связи с равными $\beta$ -функциями в месте встречи

Перспективность такого варианта рассмотрена, по результатам численного моделирования, в работе /3/. Показано, что в этом случае при достаточно малой величине линейной связи ( $|\Delta v_{min}| \lesssim 3 \cdot 10^{-3}$ ) движение близко к одномерному с соответствующими величинами  $\xi_c$  по обоим направлениям. Преимуществом данного варианта является также отсутствие модуляции, возникающей из-за зависимости  $\beta$ -функции в месте встречи от азимута.

Это связано с тем, что для круглого пучка  $\xi_{x,z} \sim \frac{\beta_{x,z}}{\sigma^2}$ ,  $\sigma \sim \sqrt{\beta}$  и при  $\beta_x = \beta_z$  зависимость  $\xi$  от азимута исчезает.

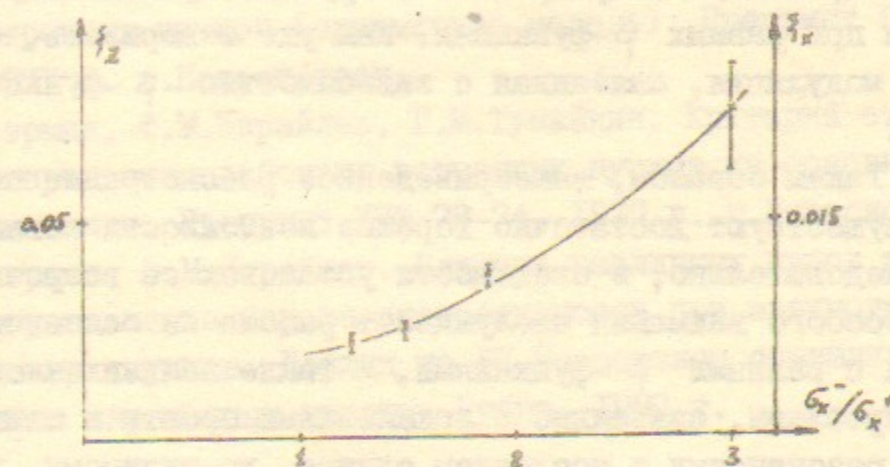


Рис.3. Зависимость  $\xi_c$  от соотношения размеров электронного и позитронного пучка.

$$J^- \gg J^+ ; E = 180 \text{ МэВ}; v_x = 3,057;$$

$$v_z = 3,076; \beta_x = 40 \text{ см}; \beta_z = 6 \text{ см}.$$

Этот вариант позволяет также использовать эффект близости к целому резонансу, как это следует из результатов раздела I, и тем самым увеличить величину  $\xi_c$ . Сложность реализации подобного режима связана с необходимостью иметь равные и малые  $\beta$ -функции в месте встречи, а также увеличенную вертикальную апертуру по сравнению с плоским пучком для электрон-позитронных накопителей.

### 5. Влияние различных модуляций

Возможность увеличения предельной плотности тока связана также с уменьшением различных модуляций бетатронного движения из-за синхротронных колебаний. Модуляция, связанная с наличием энергетической дисперсионной функции в месте встречи, рассмотрена в работе /2/. Показано, что такая модуляция может существенно понизить величину  $\xi_c$ . В настоящий момент большинство установок, как работающих, так и проектируемых, имеют нулевую  $h$ -функцию в месте встречи. Существуют, однако, другие

типы модуляций, которые могут понижать величину предельных токов, в частности: 1) модуляция набега бетатронной фазы между местами встречи из-за энергетических колебаний; 2) модуляция величины  $\xi$  из-за фазовых колебаний, связанная с зависимостью  $\beta$ -функции от азимута. Более подробно этот вопрос рассмотрен в /4/. При работе с круглым пучком на резонансе связи при равных  $\beta$ -функциях, как уже говорилось, отсутствует модуляция, связанная с зависимостью  $\beta$ -функции от азимута.

Таким образом, вышеприведенное рассмотрение показывает, что существуют достаточно хорошие возможности повышения  $\xi_c$  и, следовательно, и светимости установок со встречными пучками. Особого внимания заслуживает работа на основном резонансе связи с равными  $\beta$ -функциями, а также вблизи целого резонанса. Проблемы, связанные с искажениями орбиты и синхробетатронными резонансами в последнем случае, по-видимому, не являются неразрешимыми.

В заключение авторы выражают свою благодарность Н.С.Диканскому и Ю.М.Шатунову за полезные дискуссии.

#### Л и т е р а т у р а :

1. S. Tazzari, Symposium on Nonlinear Dynamics and the Beam-Beam Interaction, Brookhaven, 1979, p. 128.
2. Ф.М.Израйлев, С.И.Мишнев, Г.М.Тумайкин. Численные эксперименты по определению критерия стохастичности при взаимодействии встречных пучков (одномерная модель). Препринт ИЯФ 77-43, 1977 г. г.Новосибирск.
3. И.Б.Вассерман, Ф.М.Израйлев, Г.М.Тумайкин. Критерий стохастичности при взаимодействии встречных пучков на основном резонансе связи. Препринт ИЯФ 79-74, 1979 г. г.Новосибирск.
4. И.Б.Вассерман, Ф.М.Израйлев. Влияние различных типов модуляций на уменьшение порога стохастичности при взаимодействии встречных пучков. Доклад на УП Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 г.