

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПУЧКА В ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ ИФВЭ

В.И.Балбеков, К.Ф.Герцев, Г.Г.Гуров, Л.И.Копылов,  
А.Ю.Маловицкий, М.С.Михеев, А.А.Симонов  
Институт физики высоких энергий  
Серпухов, 142284

Продольная неустойчивость итеративного пучка в У-70 была замечена по резкому возрастанию фазового объема сгустков после пересечения критической энергии<sup>1</sup>. Неустойчивость сопровождается СВЧ-модуляцией тока пучка в сантиметровом диапазоне длин волн<sup>2</sup>. Такая же модуляция возникает при разгруппировке пучка перед медленным выводом. Аналогичные эффекты наблюдались на других ускорителях<sup>3-4</sup>. Для их объяснения привлекались различные гипотезы<sup>3-6</sup>, однако ни одна из них не объясняла совокупности явлений, возникающих в У-70. Поэтому было проведено дополнительное исследование, в результате которого выявлен ряд новых свойств неустойчивости и построена теоретическая модель, хорошо объясняющая наблюдаемые эффекты. В настоящем докладе содержится краткое изложение этих результатов.

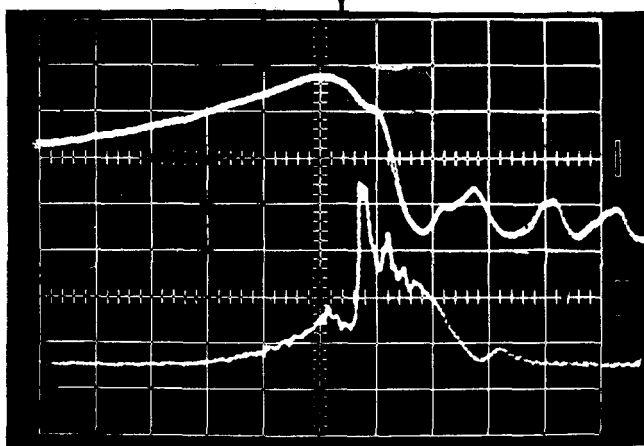


Рис. 1. Сигналы пиковых детекторов тока пучка: нижний луч – с датчика 150 МГц, верхний – (1-10) ГГц, развертка 5 мс/дел.  $N_B = 8 \cdot 10^{10}$ .

На рис. 1 показаны осциллограммы продетектированных сигналов датчиков тока пучка с полосой 0,1-150 МГц (верхний луч) и 1-10 ГГц (нижний луч). Из верхней осциллограммы видно, что незадолго до критической энергии (отмечена стрелкой) адиабатическое сжатие сгустка практически прекращается. После перехода сгусток резко удлиняется, и возникает СВЧ-модуляция (нижний луч). Картина зависит только от числа частиц в сгустке  $N_B$ , от  $N_B \lesssim 2 \cdot 10^9$  СВЧ-модуляция отсутствует, а размеры сгустка изменяются в соответствии с адиабатическим законом; при  $N_B = 8 \cdot 10^{10}$  фазовый объем возрастает примерно в 6 раз, а при  $N_B = 2,5 \cdot 10^{11}$  – более чем в 10 раз. Использование скачка критической энергии ослабляет эффект, но не устраняет полностью<sup>6</sup>.

СВЧ-модуляция возникает также после дрейфа сгустков в постоянном магнитном поле при выключенном ускоряющем напряжении (рис. 2). Это создает удобную возможность для исследования, т.к. таким способом удается вызвать неустойчивость при любой энергии, начиная по крайней мере с 5 ГэВ (критическая энергия У-70 равна 8,9 ГэВ).

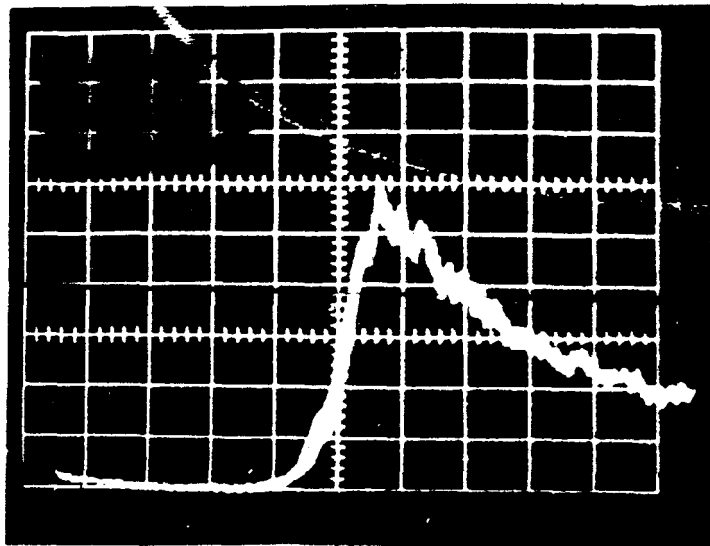


Рис. 2. Огибающая СВЧ-сигнала при разгруппировке пучка  $E=70$  ГэВ,  $N_B = 8 \cdot 10^{10}$ , развертка 2 мс/дел. Запуск через 6 мс после начала дрейфа.

На рис. 3 представлены результаты измерения СВЧ-спектров<sup>7</sup>. Отметим наиболее важные особенности. СВЧ-модуляция сравнительно узкополосна, причем ее центральная частота уменьшается с ростом энергии частиц. В районе критической энергии не наблюдается каких-либо аномалий спектров, хотя здесь они измерялись при обычном режиме ускорения. Введение скачка критической энергии не влияет на форму спектров в закритической зоне (нижняя диаграмма). Спектры имеют довольно сложную форму с несколькими максимумами, положение которых меняется при перестановке датчика в другую часть ускорителя. Это позволяет утверждать, что "тонкая структура" спектров имеет вторичное происхождение и связана с отражением волн от неоднородностей камеры в окрестности датчика.

Для дальнейшего анализа была привлечена микроволновая модель, согласно которой условие устойчивости пучка имеет вид 3:

$$\left| \frac{Z_n}{n} \right| < \frac{|n| \beta^2 E}{e J_c \Lambda_c} \left( \frac{\Delta p_c}{p} \right)^2, \quad (1)$$

где  $Z_n$  – импеданс камеры на  $n$ -й гармонике частоты обращения,  $E = mc^2 \gamma$  и  $\beta$  – энергия и приведенная скорость частиц,  $\eta = \alpha \gamma^{-2}$ ,  $\alpha$  – коэффициент расширения орбит,  $J_c$  и  $\frac{\Delta p_c}{p}$  – ток и относительный импульсный разброс в центральном сечении сгустка,  $\Lambda_c$  – множитель  $\sim 1$ , зависящий от функции распределения. При дрейфе сгустка

$$\frac{\Delta p_c^2}{J_c} \sim \frac{1}{(1 + \Omega_0^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

что и объясняет вспышку неустойчивости. Здесь  $\tau$  – время дрейфа, а  $\Omega_0$  – частота синхротронных колебаний перед его началом. Измерение  $\tau$ , а также параметров сгустка перед выключением ускоряющего напряжения дает удобный метод для вычисления импеданса. Результаты представлены в табл. 1, где указана также центральная частота СВЧ-модуляции<sup>7</sup>.

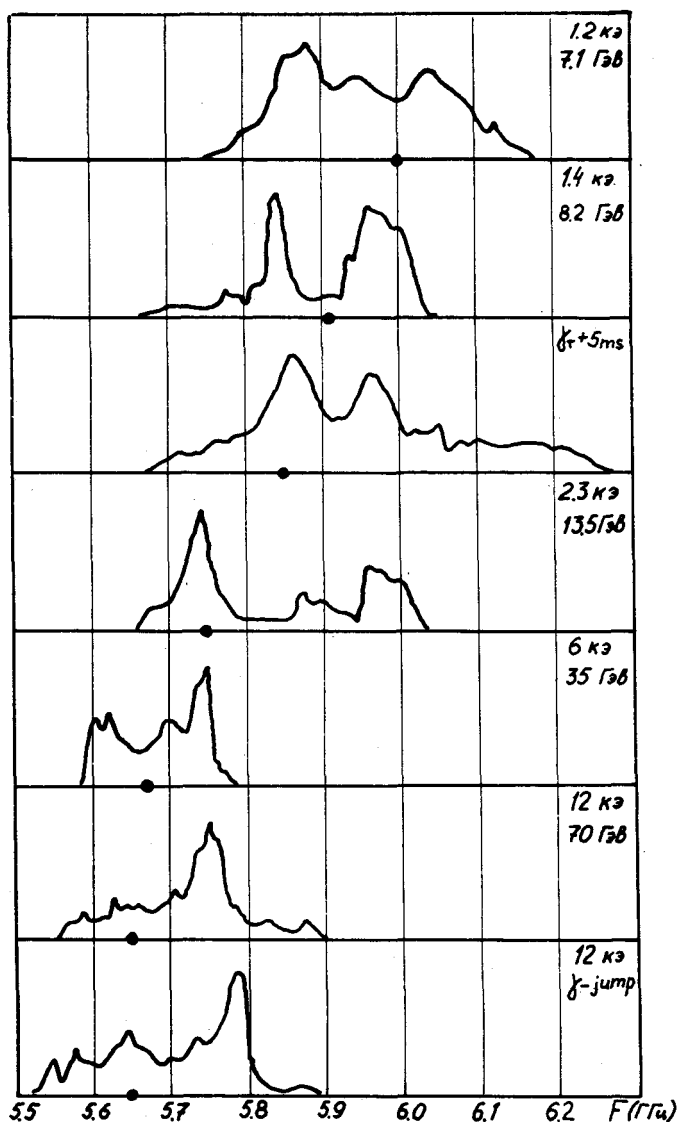


Рис. 3. Спектры СВЧ-сигнала при различных энергиях частиц.

Основные характеристики неустойчивости

Е, ГэВ	7,1	8,2	8,87	9,0	13,5	35	67	70
$f_0$ , ГГц	5,95	5,9	5,9	5,9	5,85	5,8	-	5,7
$ Z_n/n $ , Ом	90	100	120	-	-	-	300	330

Обратим внимание на большую величину импеданса, а также его зависимость от энергии частиц. Вместе с узкополосностью спектров это заставляет отвергнуть высказывавшиеся ранее гипотезы, что в закритической зоне возникает неустойчивость отрицательной массы, а в докритической — неустойчивость на сопротивлении [5,6]. Предположение об определяющем влиянии резонансных полостей камеры трудно согласовать с зависимостью импеданса и частоты модуляции от энергии в диапазоне, где скорость частиц почти не меняется.

Характер импеданса наводит на мысль, что причиной его возникновения является замедляющая структура типа диафрагмированного волновода. Роль диафрагм в У-70 могут играть гофры вакуумной камеры. Однако, известная формула для импеданса гофрированной камеры приводила к оценке  $Z_n/n \approx -40i$  Ом [8], противоречащей экспериментальным данным. Поэтому вычисление импеданса гофрированной камеры было проделано заново [9]. Показано, что для волн, длина которых

значительно превышает шаг гофра  $\ell$ , продольный компонент электрического поля удовлетворяет граничному условию:

$$\left. \frac{\partial E_z}{\partial n} \right|_{\Sigma} = \frac{n^2}{R_0^2} - \frac{\omega^2}{c^2} E_z, E_z \sim e^{i(\frac{n}{R_0} z - \omega t)} \quad (3)$$

где  $\delta\omega$  — толщина скин-слоя,  $R_0$  — радиус ускорителя,  $\alpha_{1,2}$  — коэффициенты, зависящие от формы гофров, гладкая граница  $\Sigma$  отстоит от внутренней поверхности гофров на величину

$$<\ell. \text{ Отсюда следует, что при } \omega > \omega_{\text{гр}} = \sqrt{\frac{2c^2}{\ell \alpha_{1,2}}} \text{ в такой ка-}$$

мере возможно распространение свободной электромагнитной волны с фазовой скоростью  $< c$  (здесь  $b$  — эффективный радиус камеры). Благодаря этому импеданс камеры приобретает резонансный характер:

$$\frac{Z_n}{n} = R \frac{2f_0 \Delta f}{2f \Delta f - i(f^2 - f_0^2)}, \quad f = \frac{n\beta c}{2\pi R_0} \quad (4)$$

Для У-70  $b = 6,8$  см,  $\ell \alpha_1 = 0,21$  см,  $\frac{\omega_{\text{гр}}}{2\pi} = 5,65$  ГГц. Резуль-

таты расчетов представлены на рис. 4. Кривая А дает зависимость резонансов частоты  $f_0$  от энергии и находится в хорошем согласии с данными таблицы. Кривая В дает приведенное сопротивление связи  $R$  полностью гофрированной камеры. Эта величина в  $\sim 15$  раз превышает измеренные значения  $|Z_n/n|$ . Дело в том, что камера У-70 состоит из гофрированных кусков длиной  $\sim 10$  м, разделенных различными вставками. В них возникают большие и нерегулярные фазовые сдвиги между током пучка и полем, значительно уменьшающие импеданс. Кривая С, построенная с учетом этого обстоятельства, согласуется с данными таблицы.

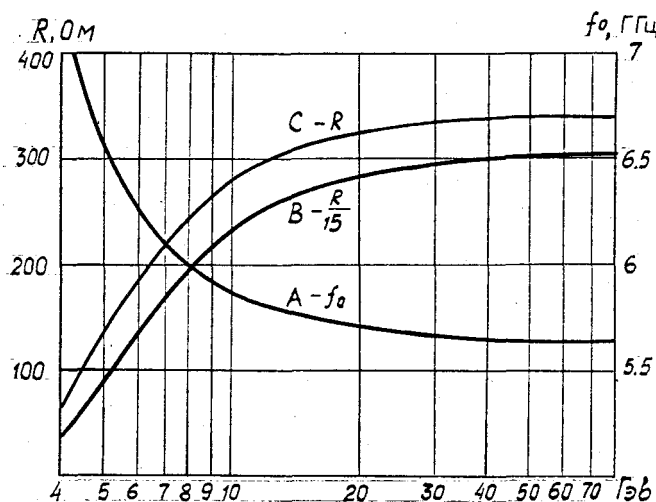


Рис. 4. Расчетные зависимости резонансной частоты (А) и приведенного сопротивления связи (В, С) гофрированной камеры от энергии частиц.

Предложенная модель подтверждается результатами измерений характеристик нескольких коротких резонаторов, изготовленных из отрезков гофрированной камеры У-70 (точки на рис. 5). Линия А дает зависимость параметра

$$\chi^2 = \frac{4\pi^2 f_m^2}{c^2} - \frac{\pi^2 m^2}{L^2} \quad \text{от}$$

резонансной частоты  $f_m$  (здесь  $L$  — длина резонатора,  $m$  — число полуволн поля на этой длине). Наличие области, для которой  $\chi^2 < 0$ , подтверждает возможность распространения в т.х.в.лн. Линия В дает погонное шунтовое сопротивление резонаторов. Те же характеристики можно рассчитать, используя граничное условие (3) и обычные условия на торцах. Расчетные результаты, показанные сплошными линиями, удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными.

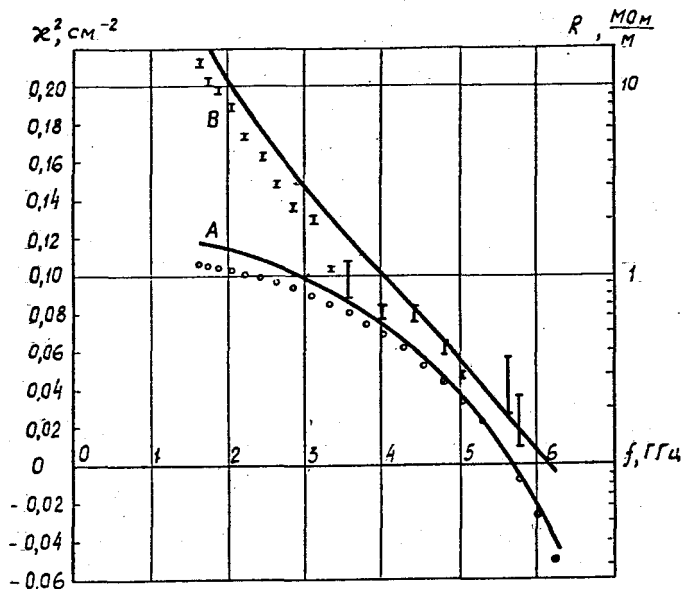


Рис. 5. Характеристики резонаторов, изготовленных из отрезков гофрированной камеры У-70.

Из измеренной дисперсионной характеристики гофрированной камеры можно найти зависимость ее резонансной частоты от энергии частиц. Эти данные, нанесенные в виде точек на измеренные спектры пучка (рис. 3), подтверждают, что причиной модуляции пучка является действие замедленной волны.

Обсудим механизм возникновения неустойчивости. Следует учесть, что формула (1) обоснована лишь для азимутально-однородного пучка, где возмущение может передаваться от частицы к частице вплоть до замыкания оборота и далее. За счет этого возникает обратная связь как необходимая предпосылка неустойчивости. В сгруппированном пучке процесс развивается иначе. Возмущение распространяется от "головы" сгустка к его "хвосту", но не переходит на соседний сгусток из-за быстрого затухания поля. Обратная связь за счет синхротронных колебаний подавлена разбросом синхротронных частот, а в дрейфующих сгустках вообще отсутствует. Поэтому обычная (регенеративная) неустойчивость невозможна, и происходит лишь перестройка равновесного распределения сгустка. Расчет показал, что при этом возникает СВЧ-модуляция тока, которая настолько резко зависит от интенсивности, что имеет почти пороговый характер  $10^{-1}$ . Величина "порога" соответствует формуле (1) с поправочным множителем, зависящим от длины сгустка и постоянной затухания поля. В нашем случае этот множитель близок к 1, и результаты вычисления импеданса по формулам (1)–(2) сохраняют силу.

Поведение пучка, взаимодействующего с резонансным импедансом в районе критической энергии, исследовалось численно <sup>11</sup>. На рис. 6 показаны расчетные амплитуды низкочастотного (верхняя кривая) и высокочастотного (нижняя кривая) сигналов при  $N_B = 1.7 \cdot 10^{10}$ ,  $R = 130$  Ом,  $f_0 = 6$  ГГц,  $\Delta f = 80$  МГц. Точка  $t = 0$  соответствует моменту перехода. Карти-

на достаточно точно повторяет наблюдаемые осциллограммы. При прохождении критической энергии "сверху вниз" — т.е. за счет уменьшения энергии частиц — сигналы остаются столь же асимметричными, однако пик неустойчивости попадает в докритическую зону. Это подтверждает, что при вс.х. энергиях действует один и тот же механизм неустойчивости. Согласно расчету, после пересечения критической энергии эффективный фазовый объем сгустка увеличивается в 5–7 раз при  $N_B = 8 \cdot 10^{10}$ , что совпадает с измеренной величиной.

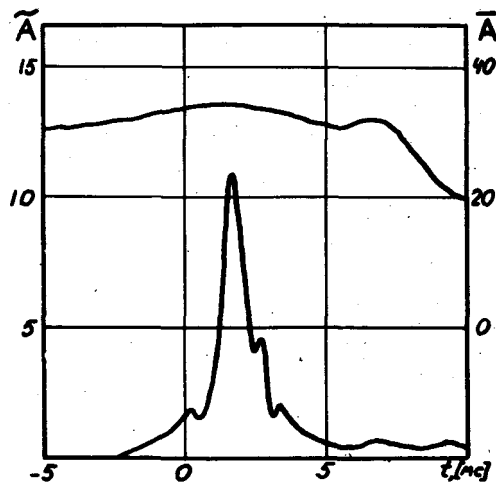


Рис. 6. Расчетные сигналы низкочастотного (верхняя кривая) и высокочастотного (нижняя кривая) пиковых детекторов при  $N_B = 1.7 \cdot 10^{10}$ ,  $R = 130$  Ом,  $\Delta f = 80$  МГц.

При достигнутом уровне интенсивности  $\sim 10^{13}$  прот/цикл неустойчивость создает значительные трудности с ускорением выд. Для обеих а.е., требуемых по условиям инжекции в УНК, необходимо использовать скачок критической энергии и уменьшить импеданс камеры при частотах  $\sim 6$  ГГц не менее, чем в 30 раз.

#### Литература

1. Г.Г.Гуров, А.Ю.Маловицкий. Препринт ИФВЭ 79-133, Серпухов, 1979.
2. Г.Г.Гуров. Труды 7 Всесоюз. совещ. по ускорит. т. 1, стр. 213, Дубна, 1981.
3. D. Boussard. CERN Lab II/RF/Int./75-2, 1975.
4. D. Boussard et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., Ns-26, p. 3482, 1979.
5. Э.А.Мяэ, П.Т.Пашков. Труды 8 Всесоюз. совещ. по ускорит. — Дубна, 1983, т. 1, с. 231.
6. Ю.М.Адо, М.Н.Горохов и др. Препринт ИФВЭ 84-120, Серпухов, 1984.
7. В.И.Балбеков, К.Ф.Герцев и др. Препринт ИФВЭ 85-129, Серпухов, 1985.
8. G. Guignard. CERN 77-10, 1977.
9. В.И.Балбеков. Препринт ИФВЭ 85-128, Серпухов, 1985.
10. В.И.Балбеков. Препринт ИФВЭ 86-73, Серпухов, 1986.
11. В.И.Балбеков, А.Ю.Маловицкий. Препринт ИФВЭ 86-74, Серпухов, 1986.