

11

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

А.А.Жоленц, А.Б.Темных

ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЯ ОРБИТЫ ПУЧКА  
НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП - 4 НА ДЕКРЕМЕНТЫ  
РАДИАЦИОННОГО ЗАТУХАНИЯ

ПРЕПРИНТ 81 - 87



ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЯ ОРБИТЫ ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ  
ВЭШ-4 НА ДЕКРЕМЕНТЫ РАДИАЦИОННОГО ЗАТУХАНИЯ

А.А.Жоленц, А.Б.Темных

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен механизм влияния положения равновесной орбиты пучка в циклических ускорителях электронов на декременты радиационного затухания. На накопителе ВЭШ-4 поставлены эксперименты, обнаружившие сильное проявление эффекта. На основании экспериментальных данных найдены участки магнитной структуры ВЭШ-4, изменение положения равновесной орбиты в которых наиболее сильно сказывается на изменении декрементов затухания.

1. На накопителе ВЭШ-4 ИЯФ СО АН СССР при изменении положения горизонтальной орбиты пучка наблюдалось перераспределение радиационных декрементов затухания радиальных и фазовых колебаний. В иных случаях этот эффект оказывался настолько большим, что перераспределение декрементов приводило к антизатуханию по одной из мод колебаний и, соответственно, к гибели пучка. Столь неожиданно сильная зависимость декрементов от положения орбиты явилась побудительной причиной разобратся в данном вопросе подробнее и провести некоторый цикл измерений. Результаты этой работы приведены в настоящем препринте.

2. Безразмерные радиационные декременты вертикальных, радиальных и фазовых колебаний ( $\nu_z, \nu_x, \nu_y$ ) записываются /1/:

$$\begin{aligned} \nu_z &= \left\langle \frac{B_z^2}{B_0^2} \right\rangle \\ \nu_x &= \left\langle \frac{B_x^2}{B_0^2} - \frac{B_z^2}{B_0^2} \frac{\psi}{R} - 2 \frac{B_z}{B_0^2} \frac{\partial B_z}{\partial x} \psi \right\rangle \\ \nu_y &= 3\nu_z - \nu_x \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $B_z, \frac{\partial B_z}{\partial x}$  - компоненты магнитного поля на равновесной орбите,  $\psi$  - дисперсионная функция,  $B_0$  - среднее поле,  $R$  - средний радиус кривизны, скобки  $\langle \dots \rangle$  - обозначают усреднение по периметру накопителя.

Представим  $B_z$  в виде:

$$B_z = b + gx \quad (2)$$

где  $x$  - горизонтальное отклонение орбиты от равновесного положения,  $b$  и  $g$  - коэффициенты разложения поля.

Найдем теперь изменения декрементов  $\Delta \nu_z, \Delta \nu_x, \Delta \nu_y$ , зависящие от  $x$ . Подставляя (2) в (1) и оставляя только линейные по  $x$  члены, получим:

$$\begin{aligned} \Delta \nu_z &= 2 \left\langle \frac{gx}{B_0} \right\rangle \\ \Delta \nu_x &= \left\langle \left( \frac{2gb}{B_0^2} - \frac{3b^2g}{B_0^2} \frac{\psi}{R} - \frac{2g^2}{B_0^2} \psi \right) x \right\rangle \\ \Delta \nu_y &= \left\langle \left( \frac{4gb}{B_0^2} + \frac{3b^2g}{B_0^2} \frac{\psi}{R} + \frac{2g^2}{B_0^2} \psi \right) x \right\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

Для жесткофокусирующих ускорителей  $v \ll g\psi$ ,  $\psi \ll R$ , поэтому:

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_z &= 0 \\ \Delta \epsilon_x &= -\Delta \epsilon_z = -2 \left\langle \frac{g^2 \psi x}{B_z^2} \right\rangle \end{aligned} \quad (4)$$

На первый взгляд можно казалось бы ожидать, что в случае, когда  $x$  описывает искажение орбиты и является знакопеременной функцией, усреднение в (4) даст для  $\Delta \epsilon_x$  малую величину. Однако, при наличии дисперсии  $\psi$  в прямолинейных промежутках  $\Delta \epsilon_x$  может быть на самом деле довольно большим. Основной вклад при этом будут давать линзы, формирующие малые  $\beta$ -функции в месте встречи. Здесь может быть большая дисперсия  $\psi$  и, как правило, велики искажения орбиты. Именно такие линзы, как будет показано ниже, и определяли на ВЭШ-4 большую чувствительность  $\epsilon_x$  к искажению орбиты.

3. Влияние искажения орбиты на  $\epsilon_x$  проверялось двумя различными способами.

В первом случае, методика измерений была построена на использовании зависимости  $\epsilon_x$  от  $\Delta f/f_0$  - относительного изменения частоты обращения /2/:

$$\epsilon_x = \epsilon_{x0} + 2\alpha \left\langle \frac{g^2 \psi^2}{B_z^2} \right\rangle \frac{\Delta f}{f_0} \quad (5)$$

Здесь  $\epsilon_{x0}$  - декремент затухания на исходной орбите  $x_0$  при частоте обращения  $f_0$ ,  $\alpha$  - коэффициент уплотнения орбит. На исходной орбите выбором частоты обращения  $f_0$  легко сделать  $\epsilon_{x0} = 0$ . Тогда в  $\epsilon_x$  будут давать вклад только члены, зависящие от  $\Delta f/f_0$  и искажения орбиты  $\Delta x = x - x_0$ .

$$\epsilon_x = 2\alpha \left\langle \frac{g^2 \psi^2}{B_z^2} \right\rangle \frac{\Delta f}{f_0} - 2 \left\langle \frac{g^2 \psi}{B_z^2} \Delta x \right\rangle \quad (6)$$

Поэтому, вводя в кольце накопителя некоторое искажение орбиты  $\Delta x$ , можно найти такое смещение частоты обращения  $\Delta f^*/f_0$ , когда декремент затухания  $\epsilon_x$  опять обратится в нуль. Это смещение частоты будет связано с  $\Delta x$  соотношением:

$$\frac{\Delta f^*}{f_0} = - \frac{\langle g^2 \psi \Delta x \rangle}{\alpha \langle g^2 \psi^2 \rangle} \quad (7)$$

В наших экспериментах задуление декремента фиксировалось по гибели пучка. Приближение к порогу по антизатуханию определялось по увеличению его радиального размера. На рис.1 представлена типичная зависимость  $1/\epsilon_x^2 \sim \epsilon_x$  от  $\Delta f/f_0$  вблизи граничной частоты. Здесь  $\epsilon_x$  - радиальный размер. Характер этой зависимости доказывает, что именно задуление декремента является причиной гибели пучка.

В процессе измерений искажение орбиты задавалось одним из корректоров полукольца ВЭШ-4. При этом максимум искажения орбиты в элементе периодичности равнялся  $\Delta x_{max} = 5$  мм. Последовательный перебор корректоров, равномерно расположенных по бетатронной фазе  $\psi$  со сдвигом фазы  $\psi/2\pi = 0.16$  позволил снять зависимость  $\Delta f^*/f_0$  от фазы возмущения. Такая зависимость, рассчитанная по формуле (7), описывается синусоидой  $\Delta f^*/f_0 = A \sin(\psi - \psi_0)$  с амплитудой  $A = 2.6 \cdot 10^{-5}$  и фазой  $\psi_0/2\pi = 0.08$ . Отсчет бетатронной фазы  $\psi$  ведется при этом от места встречи. Синусоида, построенная по экспериментальным точкам по критерию  $\chi^2$ , имеет  $A = (3.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$   $\psi_0/2\pi = 0.14 \pm 0.04$ . Расчетный и экспериментальный графики величины  $\Delta f^*/f_0$  показан на рис.2. Для магнитной структуры ВЭШ-4 изменение частоты обращения  $\Delta f/f_0 = 4.5 \cdot 10^{-5}$  дает в расчетах увеличение  $\epsilon_x/\epsilon_z$  на 1. Поэтому на рис.2 по оси ординат одновременно с  $\Delta f^*/f_0$  отложены также соответствующие значения  $\epsilon_x/\epsilon_z$ .

Второй способ наблюдения влияния искажения орбиты на  $\epsilon_x$  связан с прямым измерением времени радиального радиационного затухания. Схема эксперимента представлена на рис.3.

Сигнал с генератора шума [1] подавался на магнит [2] с вертикальным направлением поля, который использовался для возбуждения некогерентных радиальных колебаний частиц пучка. Отсутствие когерентной моды колебаний, которая, возможно, могла бы оказывать заметное влияние на времена затухания, контролировалось по сигналу с пластин [3]. Ширина вертикальной щели диафрагмы [4] была много меньше радиального размера пучка. Поэтому, при совмещении щели с центром пучка, сигнал с ФЭУ [5] был пропорционален плотности частиц в центре. После прихода импульса от генератора [6] выключался шум и запускалась АИП [7]. При этом за счет радиационного затухания амплитуда радиальных бетатронных колебаний уменьшалась и плотность частиц в центре нарастала со временем  $t$ :

$$\rho(t) = \frac{\text{Const}}{B e^{-t/\tau} + \epsilon_x} \quad (8)$$

Здесь  $B$  - константа, зависящая от силы шумовой раскачки,  
 $\tau$  - время затухания,  $\epsilon_x$  - невозмущенный радиальный размер. Сигнал с ФЭУ запоминался АЦП. Последующая обработка сигнала позволяла находить  $\tau$ .

Аналогично предыдущему методу, было проведено измерение зависимости декремента затухания  $\epsilon_x$  от фазы корректора полукольца ВЭШ-4, задающего искажение орбиты. Соответствующий график величины  $\epsilon_x/\epsilon_z$ , построенный по критерию  $\chi^2$  по экспериментальным точкам, показан на рис.4 (кривая 1). Здесь же, кривой 2, показан расчетный график. Расчетное значение амплитуды и фазы синусоиды равно:  $A = 0.45$ ,  $\varphi/2\pi = 0.08$ ; в эксперименте получено  $A = 0.45 \pm 0.15$ ,  $\varphi/2\pi = 0.07 \pm 0.05$ . Значение  $\epsilon_z$  при построении графиков было взято расчетное, так как точность измерения радиационного времени затухания по вертикали данным методом была неудовлетворительной. Ограничение возникало из-за довольно большой по отношению к вертикальному размеру пучка ширины щели. В этих измерениях максимум отклонения орбиты в элементе периодически составлял  $\Delta X_{\max} = 3$  мм.

4. Зная частоту бетатронных колебаний  $\nu$ , по экспериментальным графикам рис.2,4 можно определить конкретные линзы, ответственные за проявление эффекта зависимости декрементов затухания от положения замкнутой орбиты. Известно [1], что при задании в кольце накопителя искажения орбиты одним корректором максимум отклонения орбиты располагается на расстоянии  $\Delta\varphi$  по фазе бетатронных колебаний от данного корректора равно:  $\Delta\varphi = \pm\pi(\nu - n)$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots < \nu$ . В наших экспериментах частота бетатронных колебаний составляла  $\nu = 9.2$ . Поэтому в выбранной системе отсчета бетатронной фазы  $\varphi$  максимальное искажение орбиты будет приходиться на место встречи, если источник возмущения имеет фазу с точностью до целого числа бетатронных волн  $\Delta\varphi/2\pi = 0.1, 0.6$ . Отметим, что тогда искажение орбиты в линзах, формирующих малую  $\beta$ -функцию и отстоящих от места встречи на  $\Delta\varphi \approx \pi/2$ , минимально. Из графиков рис.2,4 мы видим, что в этом случае изменение декрементов отсутствует. Наоборот, когда искажение орбиты в месте встречи минимально, а в линзах, формирующих малую  $\beta$ -функцию, велико, эффект максимален.

Таким образом, на основании анализа экспериментальных данных можно заключить, что на накопителе ВЭШ-4 чувствительность декрементов затухания к изменению положения равновесной орбиты пучка прежде всего определяется линзами, располагающимися вблизи места встречи. Здесь имеется большая  $\psi$ -функция и вследствие большой  $\beta$ -функции могут быть заметные искажения орбиты.

5. Мы искренне признательны И.Я.Протопопову, Г.М.Тумайкину за полезные обсуждения вопросов, затронутых в данной работе, Н.И.Зиневичу за изготовление аппаратуры, используемой в экспериментах.

#### Л и т е р а т у р а

1. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. "Теория циклических ускорителей", ФМ., 1962.
2. И.Я.Протопопов. "Электрон-позитронный накопитель ВЭШ-3", диссертация, 1970.

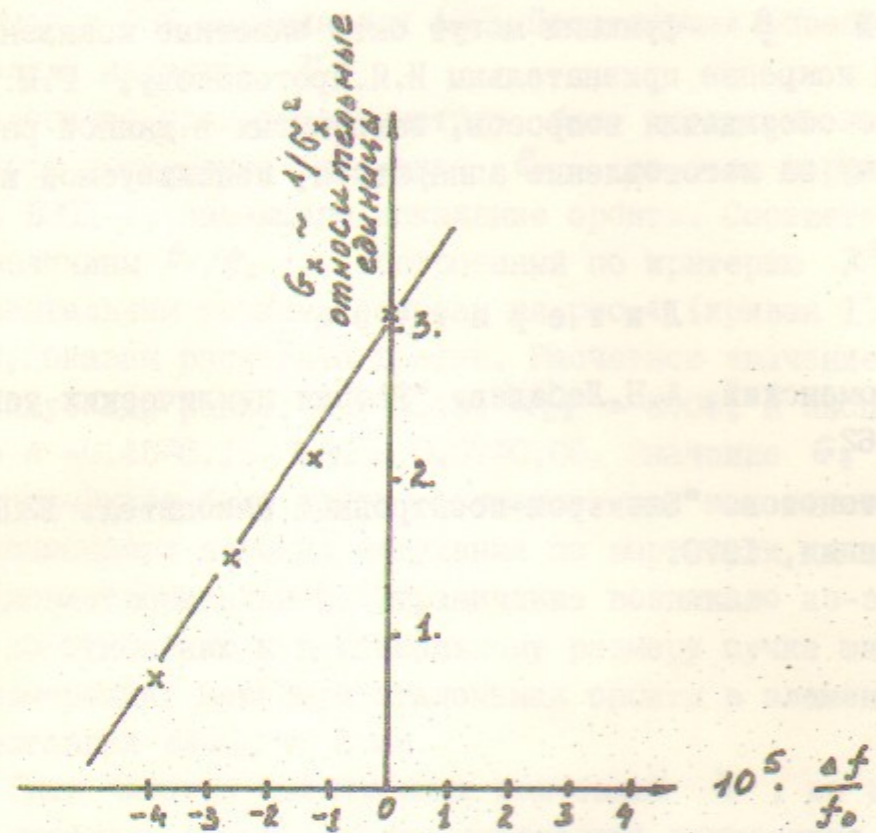


Рис.1. Зависимость декремента затухания  $\zeta_x$  от частоты обращения.

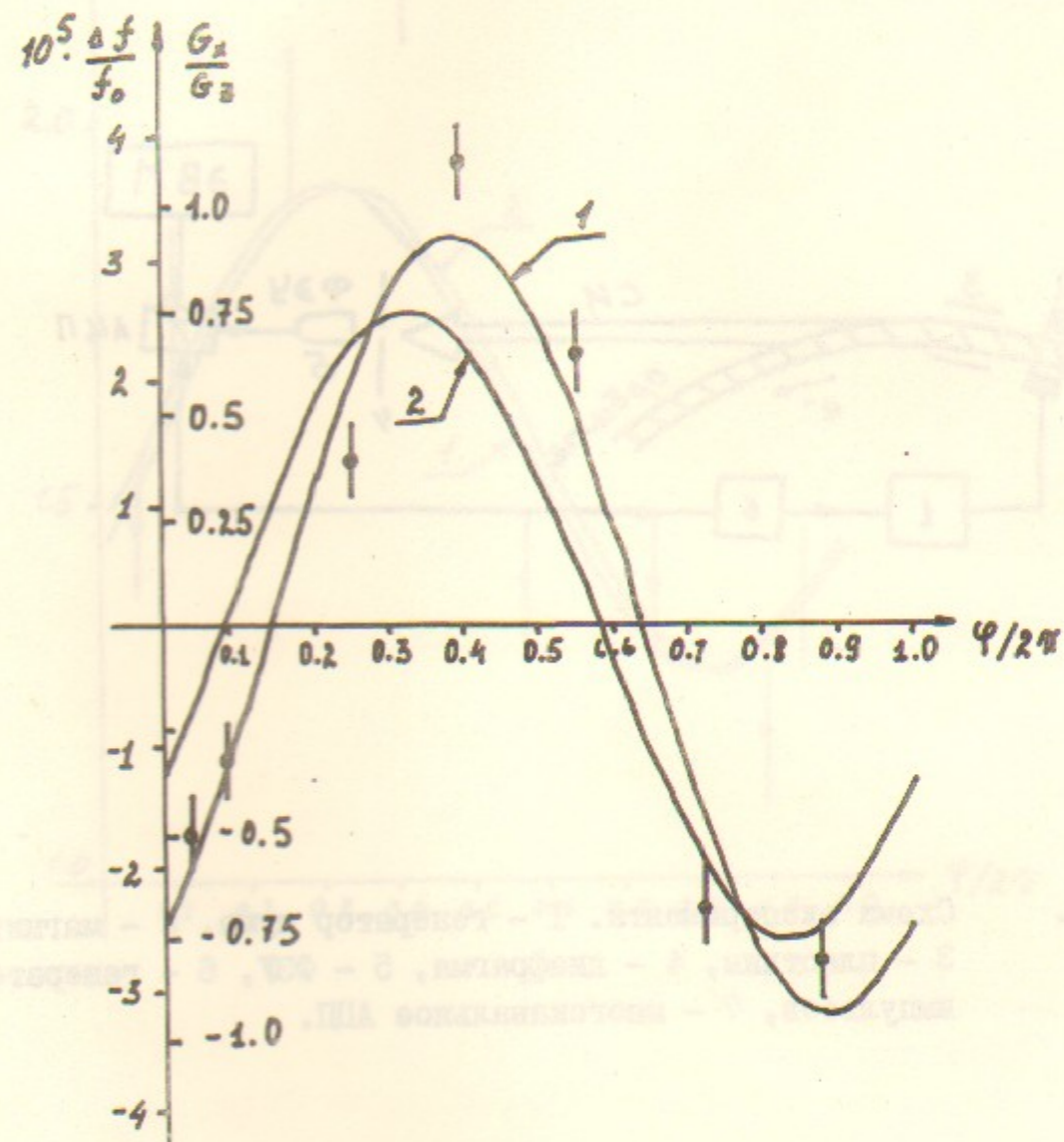


Рис.2. Зависимость  $\Delta f^H / f_0$  ( $\zeta_x / \zeta_z$ ) от  $\psi$ . Кривая I - экспериментальный график, кривая 2 - расчетный график.

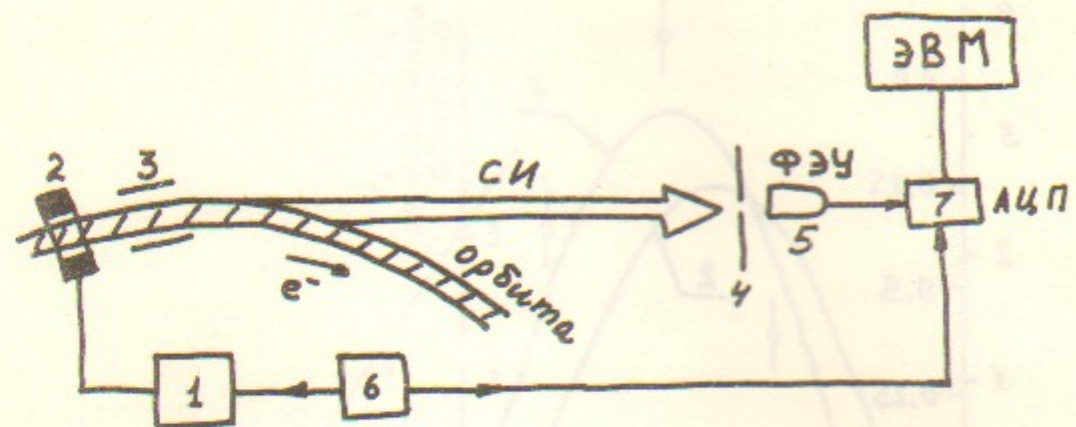
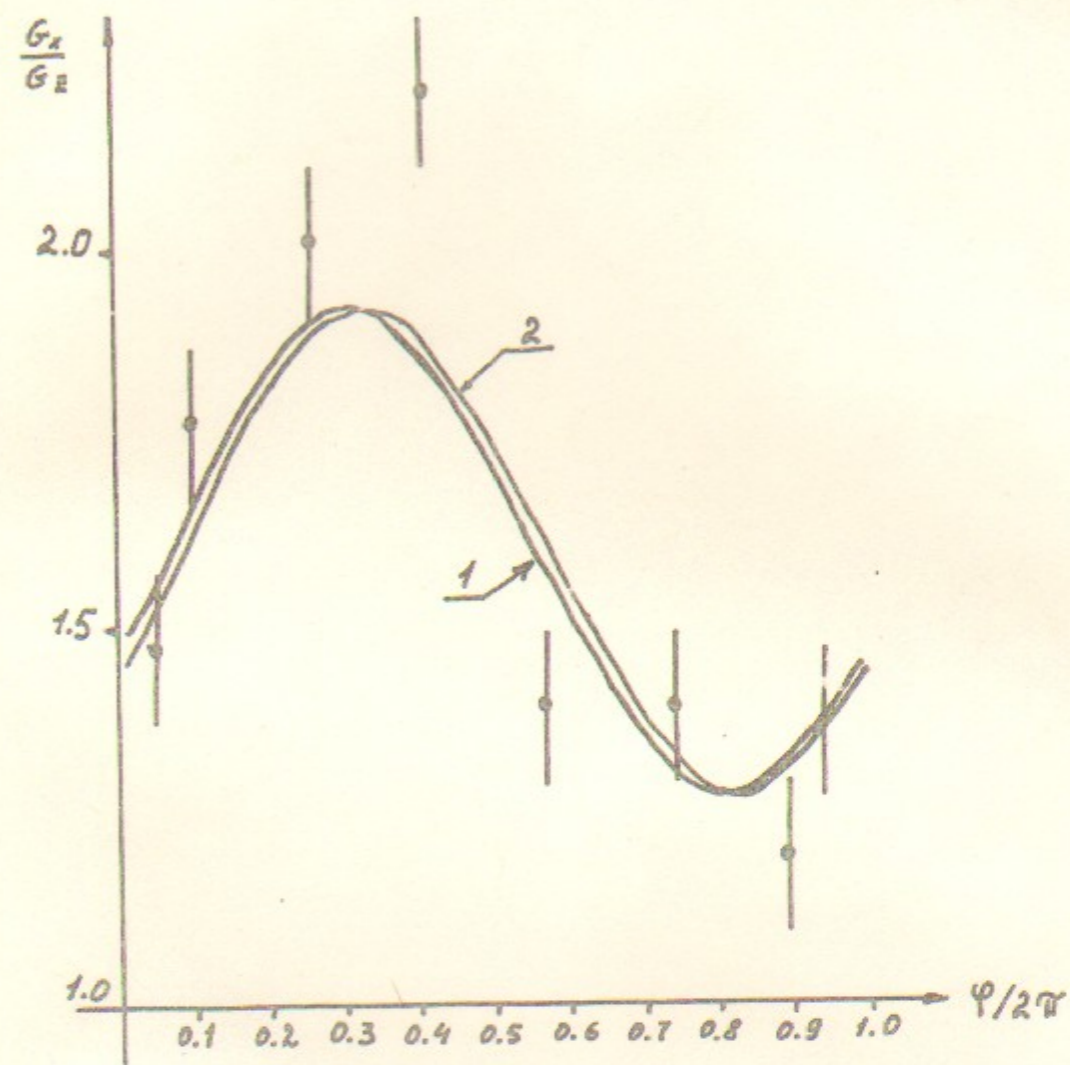


Рис.3. Схема эксперимента. 1 - генератор шума, 2 - магнит, 3 - пластины, 4 - диафрагма, 5 - ФЭУ, 6 - генератор импульсов, 7 - многоканальное АЦП.



ис.4. Зависимость  $G_x/G_z$  от  $\Psi$ . Кривая 1 - экспериментальный график, кривая 2 - расчетный график.