

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P9-91-226

Л.М.Онищенко, Н.Г.Шакун, А.Л.Шишкин,  
П.Т.Шишлянников

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОВЕСНОЙ ФАЗЫ  
В ФАЗОТРОНЕ

1991

Онищенко Л.М. и др.

P9-91-226

Определение равновесной фазы в фазотроне

В работе описаны два новых способа определения равновесной фазы в фазотроне и результаты по ее измерению на фазотроне ОИЯИ с применением этих способов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Onischenko L.M. et al.

P9-91-226

Detection of the Synchronous Phase in a Phasotron

Two new methods of the synchronous phase detection in a phasotron are described. The results of measuring the synchronous phase in the JINR phasotron are presented.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991

Величина равновесной фазы в автофазизирующих ускорителях (в фазотроне в том числе) полностью определяет динамику фазового движения. Ею определяются частота фазовых колебаний (и, значит, продольная устойчивость), площадь сепаратрисы (и, значит, максимально возможная интенсивность ускорителя). Характер изменения равновесной фазы в процессе ускорения определяет наличие или отсутствие потерь в процессе ускорения, влияет на условия вывода пучка и т.п. Поэтому желательно для понимания динамических процессов в автофазизирующем ускорителе уметь не только вычислять величину равновесной фазы, но и определять ее экспериментально.

Значение равновесной фазы в фазотроне определяется выражением<sup>1/</sup>

$$\Delta W = 2eU g \cos \varphi_s = \frac{1}{f(t)} \frac{dW(r)}{dt}, \quad (1)$$

где  $\varphi_s$  - равновесная фаза,  $\Delta W$  - набор энергии за оборот;  $r$  и  $W(r)$  - радиус и энергия равновесной частицы на этом радиусе  $f(t)$  и  $U(t)$  - частота и амплитуда ускоряющего напряжения ( $t$ -время).

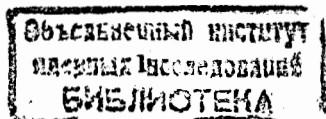
$g \leq 1$  - геометрический и пролетный фактор, определяющий максимально возможный набор энергии за оборот.

Из измерений обычно с хорошей точностью известна зависимость средней величины магнитного поля  $\bar{B}(r)$  от радиуса, а, значит, и зависимость от радиуса полной энергии частиц

$$E^2(r) = E_0^2 + (e c B R)^2, \quad (2)$$

где  $E_0$  - энергия покоя,  $c$  - скорость света. Поэтому для определения равновесной фазы нужно знать  $f(t)$ ,  $U(t)$  и  $\frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt}$  в тот момент времени, когда пучок достигает радиуса  $R$ .

Сделать это можно следующим образом<sup>2/</sup>. Перемещаемый по радиусу пробник с установленной на нем мишенью устанавливается на радиусе  $R$ . При взаимодействии ускоренного пучка с мишенью



возникает импульс нейтронного и гамма-излучений, который регистрируется с помощью сцинтилляционного детектора, расположенного вне камеры ускорителя. Импульс со сцинтилляционного детектора подается, во-первых, на вход двухлучевого осциллографа, на второй вход которого подан сигнал от датчика амплитуды ускоряющего напряжения, а во-вторых, этот импульс используется для запуска импульсного частотомера<sup>/3/</sup>, измеряющего частоту ускоряющего напряжения.

Таким образом, частотомером измеряется частота ускоряющего напряжения в момент прихода пучка на радиус R, а с помощью осциллографа определяются момент времени t прихода пучка на радиус R и амплитуда ускоряющего напряжения в этот момент времени. При этом для синхронизации осциллографа используется тот же стартовый сигнал, что и для включения ускоряющего напряжения; этот синхроимпульс вырабатывается магнитным датчиком, связанным с вариатором частоты. Перемещая пробник вдоль радиуса, получим одновременно зависимость частоты f и амплитуды U ускоряющего напряжения и времени ускорения пучка t от радиуса. На этот же график можно нанести зависимость энергии пучка E от радиуса, рассчитанную по измеренной величине магнитного поля с помощью (2).

На рис.1 и в табл.1 представлены результаты этих измерений. Дифференцируя теперь зависимость E(r) и t(r) по радиусу найдем зависимость

$$\frac{dE}{dt}_{r=R} = \frac{dE}{dr} \cdot \frac{dt}{dr} \quad (3)$$

Учитывая, что в этом же измерении были определены f и U в момент времени t (т.е. для данного значения r=R), находим теперь из (1) величину cosφ, (рис.1 и табл.1).

При этом величина g(r) для r > 40 см может с высокой степенью точности считаться равной 1. Действительно, угол пролета Q ускоряемых частиц в ускоряющем поле фазотрона для r > 40 см не превышает 30°; при этом  $g = \frac{\sin Q/2}{Q/2} = 0.99$ .

Основная погрешность в определении равновесной фазы описанным способом связана с точностью определения величины ускоряющего напряжения (~5%) и времени t. Это последнее может быть измерено (с помощью блока калиброванной задержки<sup>/4/</sup>) с точностью не хуже 2 мксек; поэтому относительная погрешность измерения времени не превышает 6% на радиусе 40 см и уменьшается до долей процента на

Таблица 1

R <sub>3</sub> см	t+t <sub>0</sub> мкс	F кГц	U, кВ	W, кэВ	R, см	Δt мкс	f кГц	ΔW кэВ	cos φ <sub>s</sub>
37	999	18217	35,3	9416	42	20	18209	5828	0,227
47	1019	201	35,2	15244	52	24	170,5	7328	0,255
57	1043	140	30,8	22572	62	28	116	8884	0,289
57	1071	092	29,7	31456	72	35	061	10457	0,257
77	1106	030	31,7	41913	82	46	17988	12125	0,226
87	1152	17946	32,7	54038	92	51	899,5	13947	0,230
97	1203	853	33,6	67985	102	51	805,5	15840	0,256
107	1254	758	34,6	83825	112	58	703,5	7897	0,252
117	1312	649	34,5	101722	122	53	599	20036	0,312
127	1365	549	34,4	121758	132	62	492	22413	0,305
137	1427	435	33,3	144171	142	57	383	25226	0,383
147	1484	331	33,2	169397	152	63	273,5	28261	0,392
157	1547	216	33,1	197658	162	80	145,5	31326	0,346
167	1627	075	33,0	228984	172	100	16986,5	34442	0,308
177	1727	16898	32,9	263426	182	132	785,5	37325	0,260
187	1859	673	31,8	300751	192	152	548	40556	0,262
197	2011	423	29,6	341307	199,5	80	358,5	21434	0,281
202	2091	294	28,6	362741	204,5	74	236,5	22125	0,322
207	2165	179	28,5	384866	209,5	80	117,5	22748	0,314
212	2245	056	27,5	407614	214,5	84	15991	23261	0,321
217	2329	15926	26,4	430875	219,5	80	868,5	23592	0,349
222	2409	811	26,9	454467	224,5	83	750,5	23749	0,341
227	2492	690	26,3	478216	229,5	81	633	23861	0,362
232	2573	576	25,8	502077	234,5	100	506,5	23839	0,295
237	2673	437	26,3	525916	239,5	101	369,5	23736	0,297
242	2774	302	25,2	549652	244,5	106	233	23587	0,293
247	2880	164	24,7	573239	249,5	116	90,5	23284	0,267
252	2996	017	2561	596523	254,5	116	14944,5	22849	0,263
257	3112	14872	25,1	619372	259,5	133	795	22481	0,232
262	3245	718	24,1	641853	264,5	150	615	22559	0,214
267	3395	572	24,0	664412					
268	3395	572	24,0						

Таблица 2

R, см	$\bar{B}$ , гс	$B_4$ , гс	$\beta$ , рад	$\rho$ , см	$\phi^\circ$	$\Delta R$ , см	$\partial \Delta R / \partial R$ , %	$\cos \varphi_s^*$
40	11984	2422	.4258	.50	-96.4	-0,06	4,0	0,217
50	12037	2519	.5915	.65	-58.4	0,34	4,0	0,245
60	12112	2549	.7547	.79	-21.0	0,74	1.3	0,285
70	12197	2528	.9163	.91	16.0	0,87	-2,7	0,264
80	12289	2489	1.0801	1.01	53.5	0.60	-6,6	0,241
90	12399	2479	-.3188	1.12	-267.0	-0,06	-7,4	0,247
100	12518	2516	-.1578	1.25	-230.0	-0,80	-5,7	0,271
110	12658	2587	.0074	1.40	-192,3	-1,37	-0,4	0,253
120	12816	2675	.1723	1.56	-154,5	-1,41	6,9	0,290
130	12990	2755	.3377	1.72	-114,6	-0,72	11	0,271
140	13184	2831	.5046	1.88	-78,3	0,38	11,7	0,338
150	13409	2910	.6721	2.03	-40,0	1,55	6,4	0,367
160	13659	2993	.8388	2.19	-1,8	2,19	-3,0	0,356
170	13930	3068	1.0050	2.34	36,3	1,89	-11,9	0,345
180	14198	3130	1.1677	2,48	73,6	0,70	-15,6	0,301
190	14484	3161	-.2468	2,59	-250,6	-0,86	-13,3	0,297
200	14785	3130	-.0890	2,65	-214,4	-2,19	-7,0	0,304
205	14936	3088	-.0113	2,65	-196,6	-2,54	-1,8	0,328
210	15086	3022	.0659	2,63	-178,9	-2,63	3,8	0,302
215	15236	2929	.1439	2,58	-161,0	-2,44	8,2	0,295
220	15375	2815	.2194	2,52	-143,7	-2,03	12,0	0,307
225	15507	2680	.2967	2,43	-126,0	-1,43	14,2	0,293
230	15628	2534	.3745	2,33	-108,0	-0,72	14,4	0,310
235	15739	2382	.4536	2,22	-90,0	0	13,2	0,256
240	15840	2228	.5336	2,11	-71,7	0,66	10,8	0,259
245	15930	2080	.6152	2,00	-53,0	1,20	7,4	0,270
250	16007	1947	.6959	1,90	-34,5	1,57	3,4	0,258
255	16073	1828	.7766	1,81	-16,0	1,74	-0,2	0,264
260	16126	1721	.8547	1,73	1,9	1,73	-3,6	0,240
265	16172	1602	.9309	1,64	19,3	1,55	-4,6	0,224
270	16217	1460	1.0101	1,52	32,5	1,28		

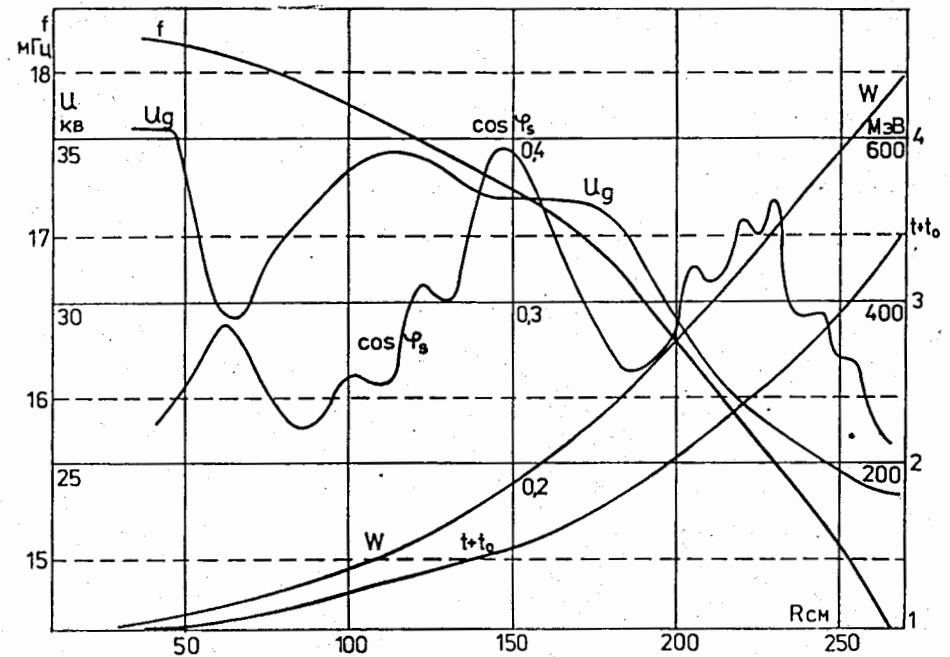


Рис. 1. Зависимости от радиуса R: частоты  $f$  и амплитуды  $U_g$  ускоряющего напряжения; времени ускорения  $t$ ; энергии  $W$  и равновесной фазы  $\cos \varphi_s$ .

конечных радиусах. Строго говоря, нужно также учесть отличие орбиты от круговой, вызванное вариацией магнитного поля. Неучет этого факта приводит к ошибке в определении шага по радиусу, возрастающей с увеличением амплитуды вариации, т.е. с радиусом до 15% (см. приложение).

Таким образом, описанная процедура позволяет с точностью не хуже 15% измерить  $\cos \varphi_s$  для радиусов, больших 40 см.

Что касается области захвата пучка в ускорение ( $0 < R < 40$  см), здесь может быть применен другой способ<sup>5/</sup> определения равновесной фазы. Суть его состоит в следующем.

Область фазовой устойчивости в фазотроне ограничена сепаратрисой, уравнение которой имеет вид<sup>1/</sup>

$$\left[ \frac{2\pi K}{geU E_s} \right]^{1/2} \Delta E = \mp 2 \left[ \sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s + \sin \varphi - \varphi \cos \varphi \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $E_s$  - полная энергия равновесной частицы,  $\Delta E$  - отклонение энергии частицы от равновесного значения,

$K = \frac{E_s}{f_s} \frac{df}{dE}$  - фактор автофазировки, характеризующий зависимость частоты обращения частицы от ее энергии,

$\varphi$  - фаза ускоряющего напряжения в момент пролета частицей ускоряющего зазора. График, описываемый уравнением [4], показан на рис. 2 в координатах  $\Delta E$  и  $\varphi$ . Внутренняя область сепаратрисы является областью устойчивых фазовых колебаний.

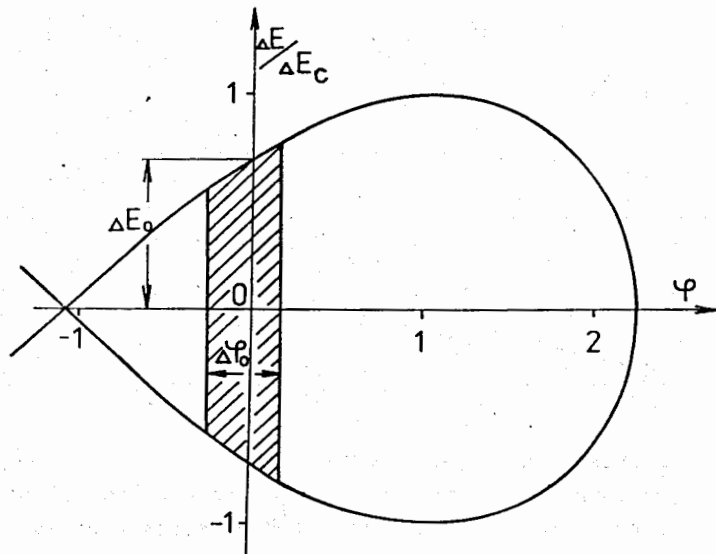


Рис. 2. Область устойчивости в фазотроне в координатах  $\Delta E$  и  $\varphi$ .

Видно, что максимального отклонения от равновесной энергии достигает частица, движущаяся по границе области фазовой устойчивости и проходящая через точку  $\varphi = \varphi_s$ . Это отклонение равно

$$\Delta E_c = 2 \left[ \frac{g e U E_s (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}{\pi K} \right]^{1/2} \quad (5)$$

Для той же частицы, но в точке  $\varphi = 0$  отклонение, как нетрудно видеть, составляет

$$\Delta E_0 = \frac{\Delta E_c}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Отклонение энергии частицы от равновесного значения связано с отклонением частоты ее обращения от частоты ускоряющего напряжения соотношением

$$\delta f = -K \frac{f_s}{E_s} \delta E \quad (7)$$

Особенность захвата частиц в фазотроне состоит в том, что захват

частиц с отрицательными начальными фазами ограничен вертикальным движением (отсутствием вертикальной фокусировки в центре для отрицательных фаз), а с положительными - набором энергии, недостаточным для огибания ионного источника и пулера на первом обороте. Таким образом, в ускорение захватываются фазы в узком фазовом интервале, лежащем вблизи  $0^\circ$ . Например, из численных расчетов найдено<sup>6/</sup>, что для модернизированного синхротрона ЦЕРНА область начальных фаз лежит в диапазоне  $(-14^\circ, 10^\circ)$ . Как было указано выше, максимальные отклонения энергии этих частиц и, соответственно, частоты обращения от равновесных значений в  $\sqrt{2}$  раз меньше, чем в максимуме сепаратрисы и равны, соответственно,  $\Delta E_0$  и  $\frac{1}{2} \Delta f$  (где  $\Delta f$  - полная полоса частот захвата).

С другой стороны, величина  $\Delta E_0$  может быть определена через время захвата  $\Delta t$ . Действительно, в течение времени захвата сепаратриса сдвигается по энергии в области фаз вблизи  $\varphi = 0^\circ$  на величину  $2\Delta E_0$ , которую можно выразить через число оборотов  $N$  и набор энергии как

$$2\Delta E_0 = N \cdot 2 g e U \cos \varphi_s$$

Величина  $N$  равна времени захвата  $\Delta t$ , деленному на период обращения  $T = 1/f$ , т.е.  $N = \Delta t \cdot f$ . Таким образом,

$$\Delta E_0 = \Delta t \cdot f \cdot g e U \cos \varphi_s \quad (8)$$

Сравнивая (5)-(8), получим (с учетом того, что  $\Delta f$  соответствует  $2\Delta E_0$ )

$$\operatorname{tg} \varphi_s - \varphi_s = \frac{\pi}{4} \Delta t \cdot \Delta f \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить  $\cos \varphi_s$  на захвате, пользуясь только измеренными величинами времени  $\Delta t$  и полосы  $\Delta f$  захвата.

Обе эти величины легко определяются при импульсной работе источника ионов. Сдвигая во времени импульс поджига ионного источника относительно частотной программы ускоряющего напряжения и измеряя при этом интенсивность пучка и частоту ускоряющего напряжения с помощью импульсного частотомера, определим как интервал времени, так и полосу частот захвата. На рис. 3 показаны результаты таких измерений для двух режимов работы фазотрона при двух значениях магнитного поля в центре ускорителя.

Изменение магнитного поля в центре осуществляется включением

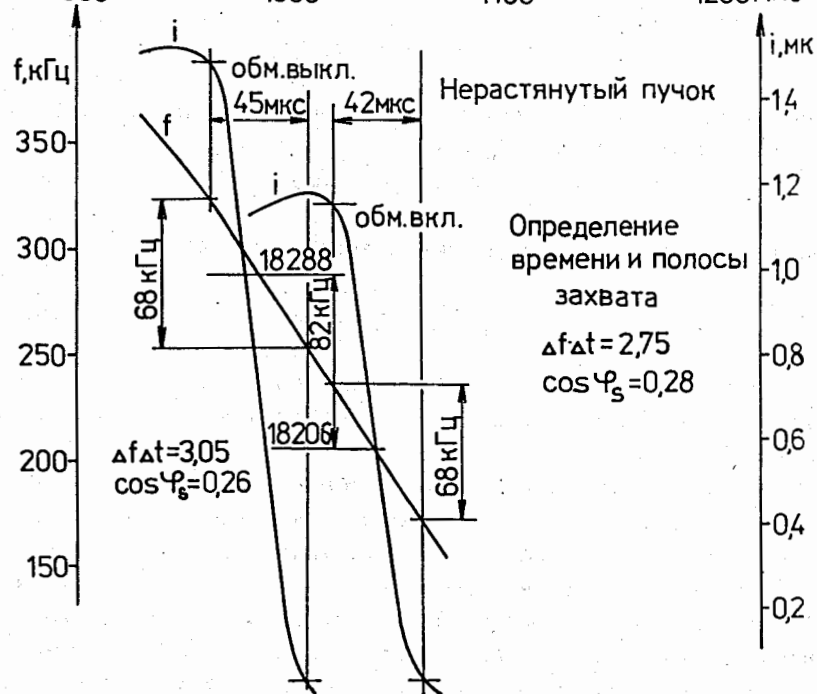
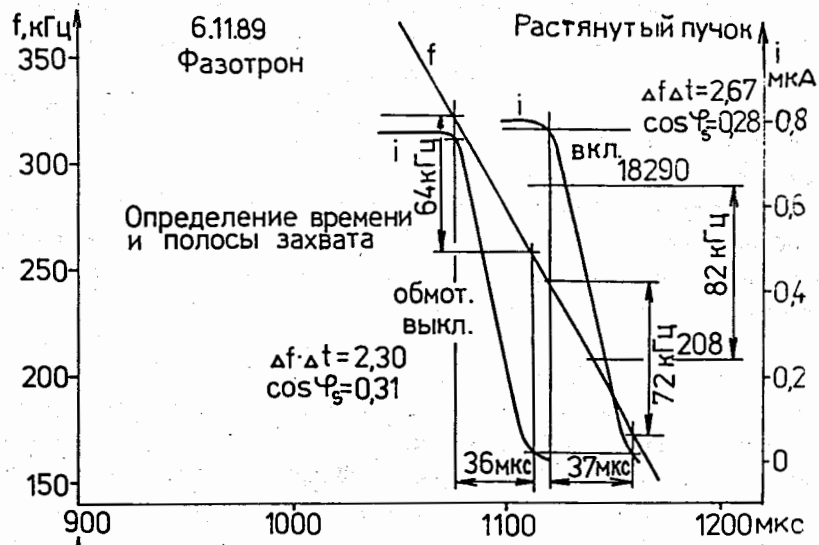


Рис. 3. Зависимость частоты на захвате  $f$  от времени и тока выведенного пучка  $i$  от временного положения импульса поджига ионного источника для двух режимов фазотрона при двух значениях магнитного поля в центре.

3-х concentric correcting coils, the total magnetic field of which is about 50 G and is directed against the main field.

The accuracy of the measurement in this case is determined, primarily, by the accuracy of determining the moments of the beginning and end of the capture, which, in its turn, is determined by the accuracy of measuring the intensity of the beam.

As is seen from Fig. 3, if the beginning of the capture is determined as the moment when the intensity is already more than 3% above the maximum, and the end - when the intensity is 97% of the maximum, the accuracy of determining the value of  $\operatorname{tg} \varphi_s - \varphi_s$  (see Fig. 4) will not be worse than 10%; at the same time the error in determining  $\cos \varphi_s$ , as is seen from the same diagram, will not exceed 2-3%.

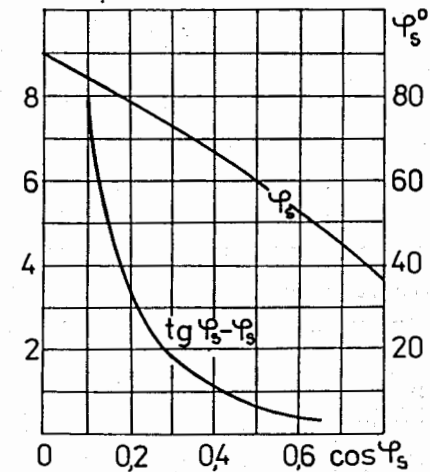


Рис. 4. Зависимость  $\varphi_s$  и  $\operatorname{tg} \varphi_s - \varphi_s$  от  $\cos \varphi_s$ .

#### Закключение

The described procedure allows with sufficient accuracy to produce the measurement of the equilibrium phase in the phaseotron. At the same time for the determination of the equilibrium phase are used easily and with good accuracy measurable quantities and are excluded such quantities, as  $g$  and  $K$ .

В зависимости  $\text{Cos}\varphi_s$  от радиуса (рис.1) просматривается модуляция с периодом по радиусу около 85 см, что близко к шагу спирали, составляющему  $2\pi\lambda = 94,25$  см.

На рис. 5 показана зависимость отклонения  $\Delta R(R)$  орбиты пучка от круговой, вызванного вариацией магнитного поля. График построен

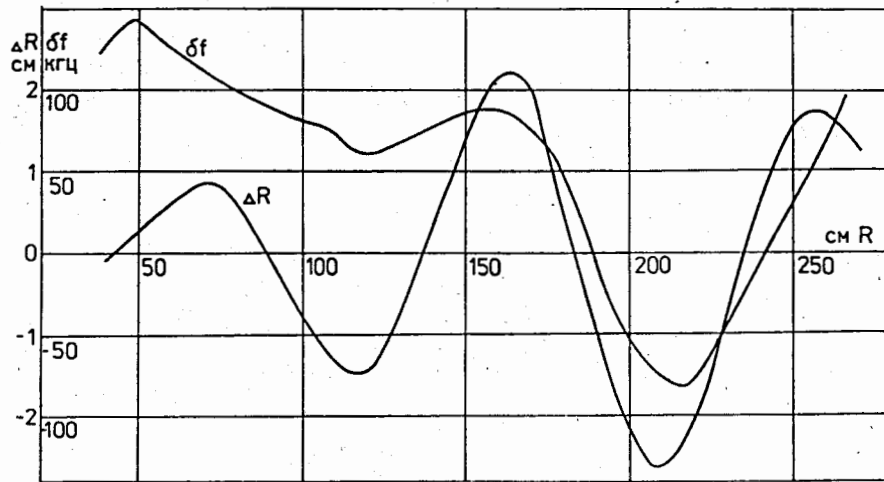


Рис. 5. Зависимость от радиуса отклонения  $\Delta R$  орбиты от круговой и отклонения  $\Delta f$  измеренной частоты обращения от расчетной.

по данным таблицы 2. В этой таблице приведены данные измерений (от 21.12.84г.) магнитного поля фазотрона: среднее значение магнитного поля  $\bar{B}$ , амплитуда  $B_4$  и фаза  $\beta_4$  четвертой гармоники поля. При этом фаза определена на азимуте, отстоящем от азимута 3-го пробника на  $138,5^\circ$  против движения пучка (почти на продольной оси дуанта).

По этим данным определена амплитуда вынужденных колебаний  $\rho(R)$  как

$$\rho \approx \frac{B_4 \cdot R}{B \cdot N^2}$$

и отклонение орбиты от круговой на азимуте 3-го пробника как

$$\Delta R = \rho \text{Cos}\phi, \quad \phi = 4\beta_4 - 4 \cdot 138,5^\circ.$$

На том же рисунке нанесена зависимость  $\delta f(R) = f_{\text{изм}} - f_{\text{расч}}$ . Явно просматривается корреляция между поведением  $\Delta R(R)$ ,  $\delta f(R)$  и  $\text{Cos}\varphi_s(R)$ , хотя и смазанная для  $\delta f(R)$  в области малых радиусов.

Связь между этими зависимостями объясняется следующим образом.

При определении  $\text{Cos}\varphi_s$  мы вычисляем набор энергии по разности расчетных значений энергии для двух последовательных значений радиуса пробника, молчаливо предполагая при этом, что радиус пробника равен энергетическому радиусу орбиты. Для круговой орбиты это так и есть. Для орбиты же, отличающейся от круговой, между этими величинами возникает различие, тем большее, чем быстрее изменяется  $\Delta R(R)$ . Из рис. 5 видно, что скорость изменения  $\Delta R(R)$  достигает максимального значения на радиусах 95, 140, 185 и 235 см, составляющего соответственно

$$\frac{\delta(\Delta R)}{\Delta R} = -8, 11, -16 \text{ и } +15 \text{ процентов.}$$

Это означает, что энергетический шаг по радиусу отличается от взятого из измерений (10 см), соответственно, на 0,8 см, - 1,1 см, 1,6 см и - 1,5 см.

Систематическая ошибка в определении энергетического набора из-за неучета этого факта составляет

$$\frac{\delta(\Delta E)}{\Delta E} = \frac{\partial(\Delta R)}{\partial R} \left[ 1 + \frac{x}{R} \left( \bar{n} + \frac{1+n}{\gamma^2} \right) + \frac{\partial n}{\partial R} \frac{x}{1+n} \right] * ,$$

$x$  - шаг по радиусу при измерениях,  $n$ -показатель роста магнитного поля.

Основной вклад в ошибку, как следует из (\*), дает первый член; сумма второго и третьего членов не превышает 0,2 даже при шаге в 10 см.

Если учесть эту ошибку, то получим исправленную кривую  $\text{Cos}\varphi_s^*$  (см.рис.6).

Исключение систематической ошибки возможно также по расхождению между измеренными и расчетными значениями частоты.

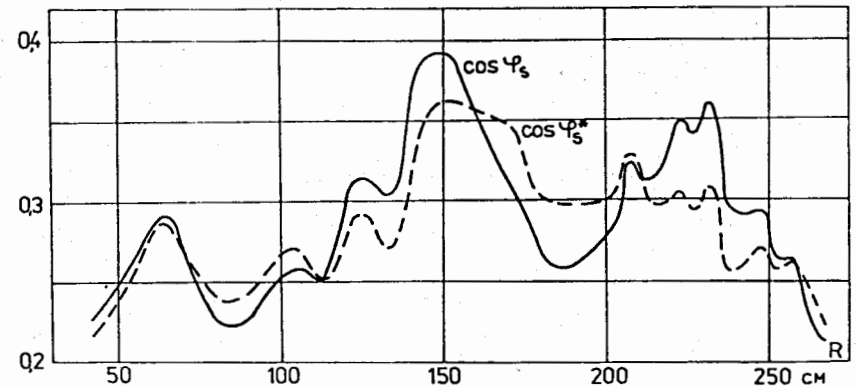


Рис. 6. Зависимость от радиуса  $\text{Cos}\varphi_s$ .



## Литература

1. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. Теория циклических ускорителей, стр. 147. Физматгиз, Москва, 1962.
2. Л. М. Онищенко а. с. 1480745 (от 15.01.89г.) ОИ, 1990, № 42, с. 262.
3. Л. В. Васильев и др. Публ. ОИЯИ Р9-80-295, Дубна 1980.
4. Л. В. Васильев и др. Публ. ОИЯИ 9-80-785, Дубна 1980.
5. Л. М. Онищенко. а. с. 1537116 (от 15.09.89). ОИ, 1990, № 42, с. 262.
6. S. Kullander NIM 62 [1968], p. 169.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 мая 1991 года.