

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



Ц 840 а

Д - 361

Э/к-1

P9 - 9140

4313/2-75

Ю.С.Дерендяев, И.Н.Иванов, А.М.Каминская,
А.К.Каминский, А.Б.Кузнецов, В.П.Рашевский,
В.П.Саранцев, Л.В.Светов

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
АДГЕЗАТОРА (3)

1975

Р9 - 9140

Ю.С.Дерендяев, И.Н.Иванов, А.М.Каминская,
А.К.Каминский, А.Б.Кузнецов, В.П.Рашевский,
В.П.Саранцев, Л.В.Светов

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
АДГЕЗАТОРА (3)



Введение

Схема коллективного ускорителя, предложенная в ОИЯИ^{/1/} получила большое распространение. Наиболее существенная часть такого ускорителя - адгезатор - выполняет следующие функции.

1. Инжекция и захват электронов из линейного ускорителя и образование кольца с неким начальным радиусом r_0 и малыми размерами a_{r0}, a_{z0} .

2. Последующее сжатие электронного кольца в импульсном магнитном поле при одновременном уменьшении его размеров r, a_r, a_z и увеличении энергии.

3. Накопление ионов в кольце за счет ионизации электронами остаточного или специально вводимого газа.

4. Ускорение электронно-ионного кольца в спадающем вдоль оси адгезатора магнитном поле.

Магнитное поле необходимой конфигурации создавалось в адгезаторах следующими системами: одновитковыми катушками, расположенными внутри металлической камеры^{/2,3/}, многовитковыми катушками, расположенными вне керамической^{/4/} или металлической^{/5/} камеры. В адгезаторе (3) (рис. 1) сохранена особенность формирования магнитного поля, используемая в^{/3/}, но предполагается использование многовитковых катушек. Геометрия катушек выбиралась такой, чтобы она позволяла производить установку внутренних экранов вблизи плоскости сжатия кольца (медианной плоскости). Это дает возможность: 1) исследовать влияние различных экранов на параметры кольца при сжатии; 2) перейти к высокому вакууму в области сжатия кольца. Конструк-

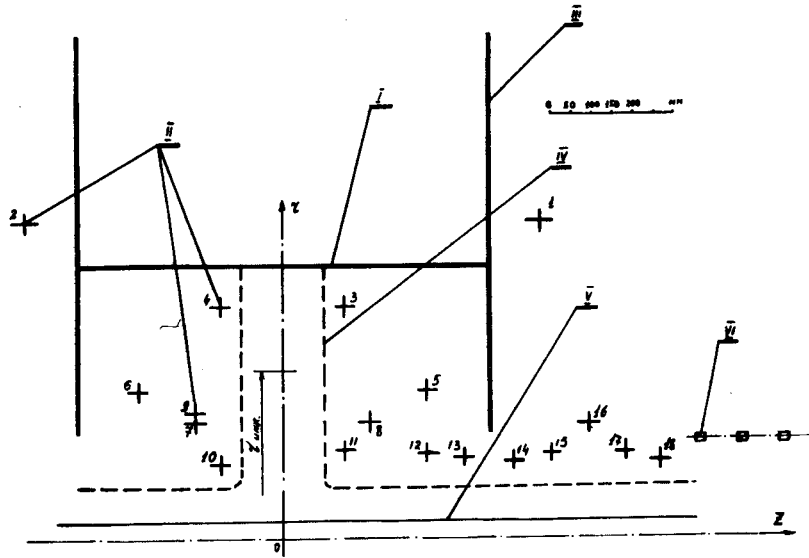


Рис. 1. Схема адгезатора. I - обечайка камеры адгезатора. II - катушки магнитной системы адгезатора. III - торцовые стенки адгезатора. IV - внутренний экран. V - труба. VI - соленоид ускоряющей системы.

ция адгезатора с внутренними экранами уменьшает требования к механической прочности экранирующих стенок по сравнению с металлическими и керамическими адгезаторами, в результате чего форма и толщина стенок, их электрические и магнитные свойства могут варьироваться в соответствии с требованиями эксперимента. Внутренние экраны можно выбрать такими, что они практически не будут искажать внешнее магнитное поле, но будут экранировать поле кольца, в результате чего можно исследовать свойства кольца без коррекции параметров внешнего поля.

Электронный пучок инжектируется в адгезатор на начальную орбиту радиуса 0,4 м. Система инжекции /6/ - постоянное и импульсное магнитные поля - обеспечивает к моменту выключения импульсного (быстрого) поля электронное кольцо на радиусе $r_0 = 0,36$ м с размерами сечения в радиальном и z -направлениях $a_r = a_z = 0,02$ м. Рассматриваемая магнитная система должна обеспечить: 1) сжатие в меридианной плоскости адгезатора электронных колец с числом частиц $N_e = 5 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{13}$, начальными значениями релятивистского фактора $\gamma_0 = 4-5$ от радиуса $r_0 = 0,36$ м до радиуса $r_1 = 0,07$ м; 2) компрессию кольца от $r_0 = 0,36$ м до $r_k = 0,045$ м с нарушением симметрии поля при сжатии и смещением кольца в z -направлении. В заданный момент времени, когда кольцо достигает определенного радиуса, внешняя магнитная яма снимается и в области между адгезатором и ускоряющей системой /7/ на радиусе вывода должно быть сформировано магнитное поле с жесткими условиями на однородность (см. §3).

В каждый момент времени поле в адгезаторе представляется суперпозицией пяти полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 + \vec{B}_5, \quad (1)$$

где \vec{B}_1, \vec{B}_2 - импульсные поля катушек адгезатора и соленоида ускоряющей системы; \vec{B}_3, \vec{B}_4 - поля вихревых токов, наводимых в камере переменными полями \vec{B}_1 и \vec{B}_2 ; \vec{B}_5 - постоянное магнитное поле.

Расчет полей $\vec{B}_k(r, z, t)$ для каждого из пяти слагаемых в формуле (1) проводился по формуле

$$\vec{B}_k(r, z, t) = \sum_{i=1}^m \vec{G}_{ik}(r, z) I_i(t). \quad (2)$$

Здесь $\vec{G}_{ik}(r, z)$ - магнитное поле, создаваемое одним витком в точке с координатами r, z при протекании в нем единичного тока, $I_i(t)$ - ток в витке как функция времени t . Суммирование - по всем виткам. Перемен-

ные поля \vec{B}_1, \vec{B}_2 создаются при протекании тока разряда конденсаторной батареи С на индуктивную нагрузку L через коммутатор. Расчет токов в таких цепях не представляет трудностей ^{/8/}.

Расчет вихревых токов в камере, наводимых катушками соленоида, проводился следующим образом: камера разбивалась на N витков с индуктивностью n-го витка L_n и сопротивлением R_n . Для определения токов в витках интегрировалась система уравнений:

$$\sum_{m=1}^N M_{nm} \dot{I}_m + R_n I_n = -\dot{\Phi}_{0n}^c; \quad (n=1, 2, \dots, N, N=120). \quad (3)$$

Здесь M_{nm} - коэффициент взаимной индукции n-го и m-го витков, $M_{nn} = L_n$, Φ_{0n}^c - поток индукции внешнего поля соленоида через контур n-го витка. Точкой обозначено дифференцирование по времени. Интегрирование проводилось при начальных условиях $I_n(t=0) = 0$.

При расчете вихревых токов, наводимых изменением потока от катушек адгезатора (Φ^a), решалась упрощенная система уравнений:

$$\sum_{m=1}^N M_{nm} I_m = -\Phi_{0n}^a. \quad (4)$$

Связано это с тем, что частоты полей адгезатора ω_a почти в 40 раз выше частот полей соленоида ω_c и для первых выполняется условие

$$\omega_a L_n \gg R_n.$$

Выбирая магнитную систему, мы стремились обеспечить возможность перехода от режима сжатия к режиму вывода кольца без коррекции геометрии катушек и использования шунтирующих коммутаторов ^{/3/}. Переход осуществляется пересоединением катушек вне камеры и регулировкой напряжения (тока) в цепи питания катушек. Кроме того, конфигурация магнитного поля, обеспечивающего сжатие кольца при выключенном соленоиде, не должна существенно отличаться от распределения поля при включении соленоида.

Однако различие в частотах магнитных систем адгезатора и соленоида (согласование систем при выводе кольца производится в области максимумов обоих

полей) требует, чтобы поле соленоида включалось раньше поля адгезатора и весь цикл сжатия кольца происходил, когда поле соленоида близко к своему максимальному значению, в то время как поле адгезатора меняется от величины $2 \cdot 10^{-2} T$ в области радиусов порядка радиуса инжекции до значения 1,3 T на конечном радиусе. Распределение $B_r^c, B_z^c - B_r, B_z$ - компонент поля соленоида в медианной плоскости адгезатора для радиусов 0,36 м - 0,045 м приведено в табл. 1. Расчет проводился при следующих предположениях: 1) величина поля в центре соленоида на радиусе 0,045 м равна 1,35 T; 2) влияние экранов не учитывается; 3) соленоид находится на расстоянии 1 м от медианной плоскости адгезатора. В этой же таблице приведены значения $B_r^a, B_z^a - B_r, B_z$ - компонент поля адгезатора для той же области радиусов,

Таблица 1

Экранирование поля соленоида камерой

z	$B_r^c \cdot 10^4 (Г)$	$B_z^c \cdot 10^4 (Г)$	$B_r^a \cdot 10^4 (Г)$	$B_z^a \cdot 10^4 (Г)$	$B_r^c \cdot 10^4 (Г)$	$B_z^c \cdot 10^4 (Г)$
0.96	41.5	100	1.9	220	5.17	5.35
0.94	38.7	111	2.4	256	3.17	5.59
0.92	37.1	113.2	3.0	290	3.16	5.81
0.90	35.2	115.1	3.5	328	3.13	6.03
0.88	33.3	117	3.8	377	3.07	6.27
0.86	31.4	118.8	4.5	431	3.00	6.50
0.84	29.3	120.1	5.3	507	2.90	6.75
0.82	27.3	120.7	5.7	600	2.77	6.99
0.80	24.9	123	6.6	730	2.62	7.22
0.78	22.9	124.6	7.3	870	2.45	7.45
0.76	20.5	125.8	9.0	1100	2.25	7.67
0.74	18.0	127	11.4	1240	2.03	7.88
0.72	15.7	128	12.7	1337	1.79	8.07
0.70	13.1	129	24	2600	1.52	8.23
0.68	10.5	129.8	36.3	4270	1.24	8.37
0.66	8.1	130.4	62.5	7500	0.95	8.48
0.645	5.3	131	60	13500	0.64	8.56

рассчитанные из инвариантов сжатия для $\gamma_0 = 5$. (Значения V_r^a в медианной плоскости равны нулю; для сравнения в таблице указаны значения $V_r^{a,*} = \frac{z_0}{r} n V_z$ для $z_0 = 0,01$ м). Здесь n - показатель спада поля на радиусе r . Из таблицы видно, что наибольшее искажение поля при включении соленоида имеет место на больших радиусах. Это приведет к смещению и деформации плоскости симметрии магнитного поля, изменению величины и характера распределения поля, смещению равновесной орбиты кольца, в результате чего пучок сразу после инжекции будет совершать большие бетатронные колебания в r - и в z -направлениях.

Уменьшать искажение поля в адгезаторе за счет удаления соленоида нежелательно по следующим причинам: 1) увеличивается область формирования поля, обеспечивающего транспортировку кольца до ускоряющей системы; 2) увеличивается радиус кольца при влете в ускоряющую систему (см. §3). При использовании методики расчета экранирования переменных магнитных полей проводящими экранами, обладающими аксиальной симметрией^{9/}, которая дала хорошее согласие с экспериментом, была рассчитана конструкция камеры адгезатора, позволяющая уменьшить поле соленоида в интересующей нас области радиусов в 15-20 раз. Существенное экранирование поля в области больших радиусов достигнуто за счет увеличения внешнего радиуса торцовых стенок камеры (рис. 1) и их малого удельного сопротивления. Стенки камеры выполнены из дюралюминия и имеют толщину 0,02 м. Обечайка камеры (толщиной 0,01 м) - из нержавеющей стали. В табл. 1 приведены также значения V_r^{lc} , $V_z^{lc} - V_r$, V_z - компонент поля соленоида в медианной плоскости адгезатора с учетом экранирования поля соленоида камерой. Расчет систем сжатия и вывода кольца проводился с учетом полей вихревых токов в выбранной конструкции камеры.

При выборе параметров магнитной системы основное внимание уделялось обеспечению условий одночастичной устойчивости - выбору оптимальной зависимости показателя спада поля $n = n(r, t)$. Для некоторой выбранной геометрии катушек и заданного закона изменения тока вычислялись: 1) характеристики поля \bar{V}_r, V_z, n на радиусе равновесной орбиты кольца, \bar{V}_z - среднее значение V_z - компоненты поля в круге равновесного радиуса; 2) динамические характеристики кольца (равновесный радиус - r_p , размеры его сечения - a_r, a_z , частоты бетатронных колебаний неравновесных частиц - ν_r, ν_z , значение релятивистского фактора - γ и др.). На основе анализа результатов расчета параметры магнитной системы корректировались, и снова считалась динамика кольца. Параметры выбранной магнитной системы сжатия приведены в табл. 2, где указаны: средние радиусы кату-

Таблица 2
Параметры магнитной системы сжатия и вывода кольца

N	R(м)	Z(м)	W	J(a)	ω /сек	t(сек)	ПРИМЕЧАНИЕ	
1	0.75	0.62	100	$3.37 \cdot 10^3$	-	-	КАТУШКИ ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ	
2	0.75	-0.62	100	$3.37 \cdot 10^3$	-	-		
3	0.55	0.15	4	$2.5 \cdot 10^4$	$5.24 \cdot 10^3$	0	I СТУПЕНЬ СЖАТИЯ	I СТУПЕНЬ ВЫВОДА
4	0.55	-0.15	4	---	---	---		
5	0.35	0.35	4	---	---	---	II СТУПЕНЬ СЖАТИЯ	II СТУПЕНЬ ВЫВОДА
6	0.35	-0.35	4	---	---	---		
7	0.27	0.21	8	---	$4.19 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^2$	III СТУПЕНЬ ВЫВОДА	
8	0.27	-0.21	8	---	---	---		
9	0.29	-0.21	8	---	---	---		
10	0.18	-0.14	15	$3 \cdot 10^4$	$6.28 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^4$		
11	0.21	0.15	3	---	---	---		
12	0.20	0.34	4	---	---	---		
13	0.19	0.44	6	---	---	---		
14	0.18	0.56	5	$2.5 \cdot 10^4$	---	---		
15	0.20	0.65	5	---	---	---		
16	0.27	0.74	6	---	---	---		
17	0.20	0.85	4	---	---	---		
18	0.18	0.92	3	---	---	---		

шек R и их координаты Z , число витков в катушке W , ток в каждом витке I , время включения t и частота ω .

Катушки (1-2) обеспечивают постоянное во времени магнитное поле, величина которого соответствует радиусу кольца $r_0 = 0,36$ м. Показатель спада поля на радиусе r_0 равен $n_0 = 0,3$. Включение первой ступени сжатия (катушки 3-6) обеспечивает компрессию кольца в медианной плоскости от радиуса $r_0 = 0,36$ м до радиуса $r = 0,12$ м. В момент времени $t = 9 \cdot 10^{-5}$ с (за начало отсчета времени принято время включения первой ступени), когда кольцо находится на радиусе $r = 0,17$ м, включается вторая ступень сжатия (катушки 7,8). В суммарном поле кольцо сжимается до радиуса $0,07$ м. Кривые изменения равновесного радиуса кольца и показателя спада поля при сжатии приведены на рис. 2. На рис. 3 показаны траектории кольца в координатах ν_r, ν_z для числа частиц $N_e = 5 \cdot 10^{12}, 2 \cdot 10^{13}, 5 \cdot 10^{13}$. Выбранная n -траектория удовлетворяет следующим требованиям: 1) при заданных параметрах магнитной системы вся кривая $n(t)$ лежит

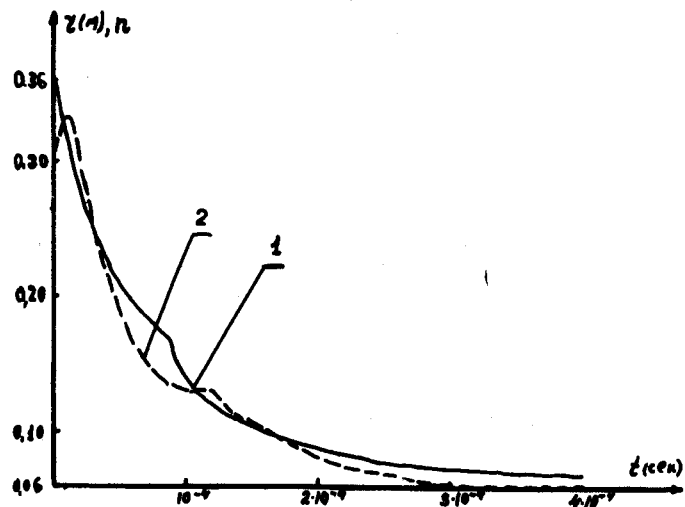


Рис. 2. r, n -траектория кольца при сжатии. 1 - $r=r(t)$, 2 - $n=n(t)$.

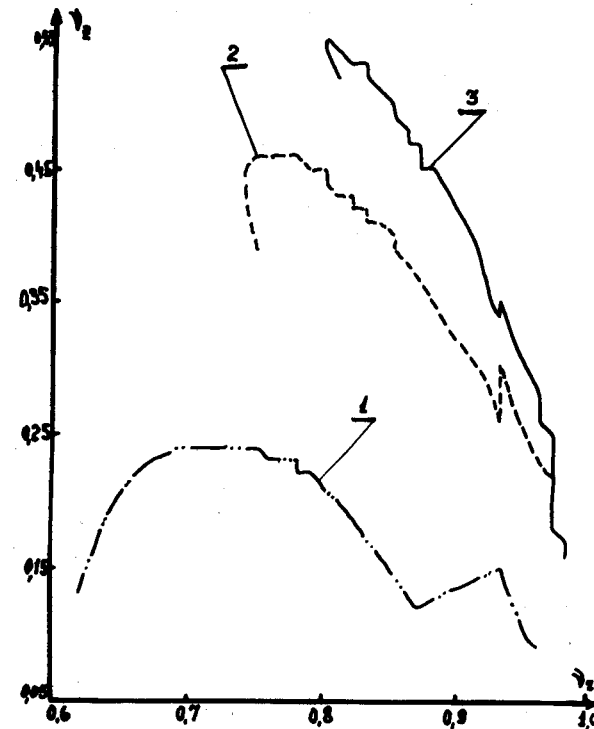


Рис. 3. ν_r, ν_z - траектория кольца при сжатии. 1 - $N_e = 5 \cdot 10^{13}$, 2 - $N_e = 2 \cdot 10^{13}$, 3 - $N_e = 5 \cdot 10^{12}$.

ниже резонансных значений $n = 0,5$; $n = 0,36$ и пересекает резонансные прямые $n = 0,25$ и $n = 0,20$ один раз; проходятся указанные резонансы в направлении увеличения частоты колебаний; 2) радиус перехвата на вторую ступень выбран таким, что разброс во времени включения второй ступени $\Delta t_2 = \pm 1 \cdot 10^{-5}$ с несущественно изменит n -траекторию кольца; 3) изменением соотношения токов в первой и второй ступени, радиуса перехвата кольца можно контролируемым образом менять r, n -траекторию кольца; 4) изменением амплитуд токов во всех ступенях можно обеспечить одинаковые n -траектории кольца для $\gamma_0 = 5$ и $\gamma_0 = 4$.

Включение соленоида с учетом экранирования его поля камерой приводит к смещению плоскости симметрии кольца при инжекции на величину $\delta = 0,015$ м и, следовательно, к Z -колебаниям электронов в кольце с амплитудой δ ; искажения V_z -компоненты поля адгезатора малы. Влияние остаточного поля V_z^{1c} можно существенно уменьшить, например, подключением последовательно к одной из обмоток постоянного поля дополнительных витков. Компенсацию компоненты V_z^{1c} можно осуществить с высокой точностью (0,1%) регулировкой амплитуды тока в витках постоянного поля.

83. Формирование поля при выводе

Для того, чтобы вывести кольцо из адгезатора, необходимо в определенный момент времени снять магнитный барьер, мешающий выводу. Если в момент снятия барьера обеспечить в области вывода спадающее в направлении оси z магнитное поле, то кольцо будет двигаться в направлении оси z с ускорением, определяемым градиентом среднего поля \bar{V}_z . Для того, чтобы ионы, накопленные в электронном кольце при сжатии, не оторвались от него в процессе вывода, величина ускорения (величина градиента среднего поля) должна быть ограничена. Расчет предельно допустимых градиентов поля при выводе кольца, нагруженного протонами, приводит, например, в 10^4 и для параметров колец, ожидаемых в адгезаторе (3), составляет 10^{-1} Т/м. Второе ограничение на допустимые градиенты поля при выводе следует из допустимого увеличения радиуса на входе в ускоряющую систему. Радиус кольца при влете в ускоряющую систему зависит от размеров резонатора и радиуса, на котором сформировано градиентное поле $1/7$, и не должен превышать 0,05 м. Следовательно, максимально допустимое увеличение радиуса кольца при выводе составляет $5 \cdot 10^{-3}$ м, откуда следует допуск на предельно допустимый градиент поля $\frac{\partial V_z}{\partial z} \leq 2 \cdot 10^{-1}$ Т/м.

Требуемая величина градиента поля на длине 0,01 м сравнима с точностью расчетов полей с учетом полей вихревых токов. Учитывая то, что при выводе кольца в ускоряющую систему не требуется получения максимально возможной энергии ионов (напротив, величину ускорения желательно иметь минимальной, чтобы обеспечить условие удержания ионов в кольце), при расчете мы рассматривали магнитную систему, обеспечивающую однородное поле в области вывода. В процессе магнитных измерений в камере адгезатора можно будет устранить локальные неоднородности поля и сформировать поле с заданным градиентом в направлении оси z , для чего предусмотрена регулировка z -координат катушек и токов (напряжений) в цепи питания.

Область вывода кольца можно разделить на три части:

1. Область внутри адгезатора, вдали от торцевой стенки камеры. В этой области вклад поля соленоида мал по сравнению с вкладом поля катушек адгезатора.
2. Область вблизи торцевой стенки адгезатора. Это область максимального искажения полей из-за токов Фуко, причем камера по-разному экранирует поля адгезатора и соленоида.
3. Область между адгезатором и соленоидом. В этой области вклад поля катушек адгезатора, расположенных внутри камеры, мал по сравнению с полем соленоида. Формирование поля вывода на этом участке осуществляется, как и на модели коллективного ускорителя $1/3$, системой катушек, расположенных вне камеры адгезатора, названных катушками переходного участка. В адгезаторе модели частота магнитного поля катушек переходного участка совпадала с частотой поля соленоида. Это увеличивало искажение поля в плоскости сжатия кольца и затрудняло формирование поля вывода: согласование полей разных частот проходило в области торцевой стенки камеры. В адгезаторе (3) частота магнитной системы катушек переходного участка выбрана равной частоте третьей ступени компрессии. С учетом этого удалось выбрать радиус отверстия в

торцевой стенке камеры достаточно большим, чтобы искажения от нее были достаточно протяженными.

Выбор параметров магнитной системы, обеспечивающей однородное поле в области вывода кольца, проводился с учетом следующих ограничений.

1. Величина тока I (напряжения U) в цепи ограничена параметрами коммутаторов.

$$(I_{\max} \leq 3 \cdot 10^4 \text{ А}, U_{\max} \leq 3 \cdot 10^4 \text{ В}).$$

2. Количество коммутаторов должно быть минимальным. Следовательно, регулировку тока (напряжения) можно осуществлять не в каждой катушке в пределах $0 \leq I \leq I_{\max}$, $0 \leq U \leq U_{\max}$, а в соответствии с выбранной схемой питания.

3. Расстояние от катушек до стенки (d) должно быть больше некоторой заданной величины ($d_0 = 0,06 \text{ м}$). Величина d_0 выбрана с учетом требований на жесткость крепления катушек и учитывает возможность коррекции z -координат катушек в камере.

4. Параметры магнитной системы соленоида считались заданными и не варьировались в процессе формирования поля.

После предварительного выбора параметров системы (числа катушек, их геометрии, числа витков в катушках и величины токов в них) токи и числа витков в катушках были зафиксированы, а геометрия катушек оптимизировалась с использованием программы оптимизации FUMILI из библиотеки БЭСМ-6. При определении производных минимизируемой функции по параметрам производные от токов Фуко не рассчитывались: учет влияния вихревых токов осуществлялся с помощью итераций. Более полно процесс оптимизации параметров системы вывода изложен в [11]. На рис. 4 показано распределение B_z -компоненты суммарного поля, определяемого уравнением (1) до оптимизации с помощью FUMILI (кривая 1) и после оптимизации (кривая 2). Исходя из наших технических условий, мы ограничили точность расчета, оставив локальные искажения $\sim \pm 3 \cdot 10^{-3} \text{ Т}$ на уровне 1,3 Т.

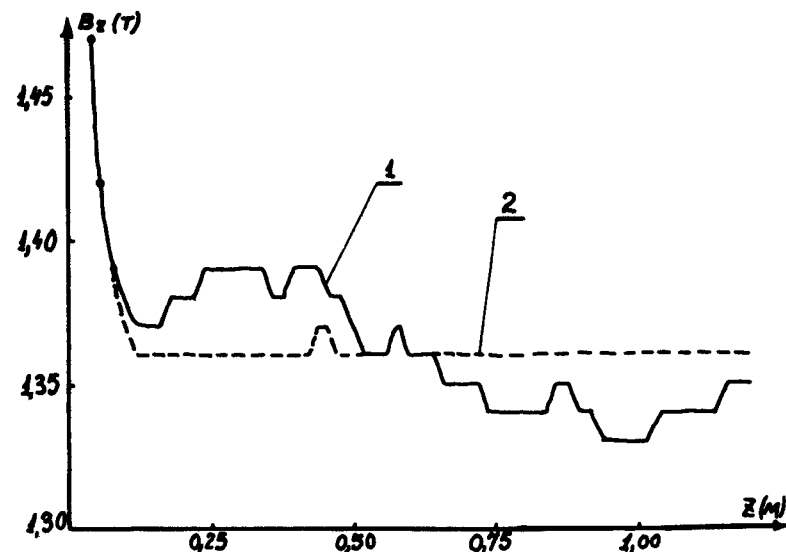


Рис. 4. Результат оптимизации поля с помощью FUMILI. 1 - распределение $B_z = f(z)$ для $r = 0,045 \text{ м}$ до включения FUMILI, 2 - то же после оптимизации.

Параметры выбранной системы приведены в табл. 2. Первая ступень - та же, что и в режиме сжатия кольца в медианной плоскости. В момент времени $t = 9 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ включается вторая ступень (катушки 7,8,9). Из-за асимметрии токов относительно медианной плоскости происходит деформация магнитной ямы. Дальнейшее сжатие кольца сопровождается его смещением одновременно со смещением точки $B_r = 0$ в z -направлении. В момент времени $t = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ включается третья ступень: катушки 10-13, расположенные внутри камеры адгезатора, и катушки переходного участка 14-18. В суммарном поле кольцо сжимается до конечного радиуса $r_k = 0,045 \text{ м}$, смещаясь вместе со смещением ямы в z -направлении. К моменту достижения

максимума тока в катушках третьей ступени формируется выводной уровень поля во всей области вывода. Поскольку расчетное поле имеет локальные неоднородности, то расчет динамики кольца по инвариантам сжатия

$$r^2 (B_z - \frac{1}{2} \bar{B}_z) = \text{const}, \quad (5)$$

$$B_r = 0$$

производится только до момента времени, когда оно окажется в первой локальной яме.

Изменения радиуса r и z -координаты равновесной частицы, а также показателя спада поля n в зависимости от времени для $0 \leq t \leq 3 \cdot 10^{-4}$ с показаны на рис. 5. На рис. 6 приведена траектория кольца в координатах ν_r, ν_z . Обращает на себя внимание точка $\nu_z = 1/3$. Если взять искажение поля на этом радиусе 1% (что является условным и завышенным параметром, ибо эта точка проходит вдали от мест возможных азимутальных искажений), то оценки показывают превышение реальной скорости прохождения резонанса над допустимой примерно на порядок.

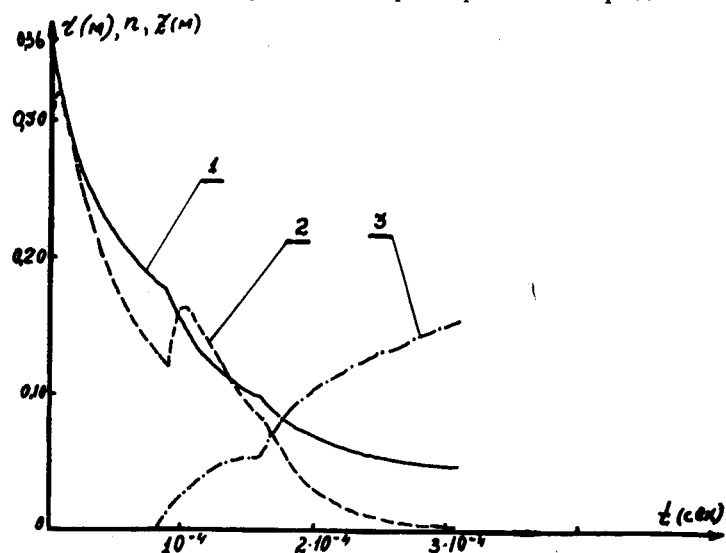


Рис. 5. r, n, z - траектория при работе системы вывода. 1 - $r=r(t)$, 2 - $n=n(t)$, 3 - $z=z(t)$.

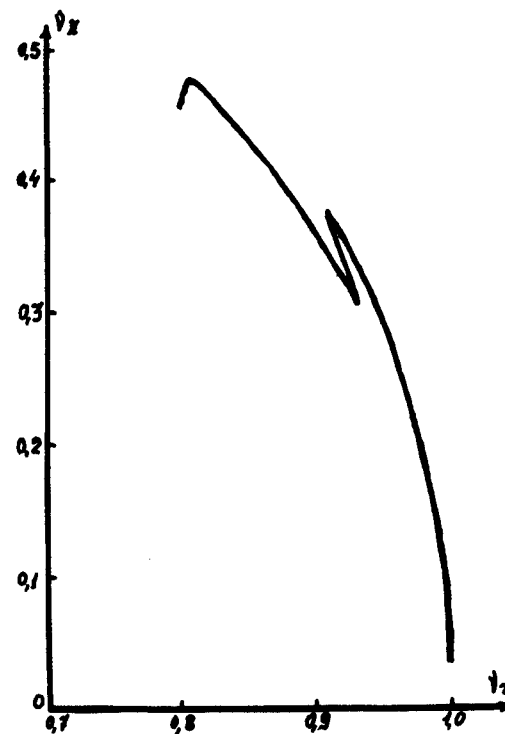


Рис. 6. Траектория кольца в координатах ν_r, ν_z .

§4. Влияние фокусирующей трубы на форму поля при выводе

Эффективность ускорения ионов кольцом в спадающем магнитном поле определяется радиальной компонентой этого поля. В работе/12/ показано, что установка в адгезаторе металлической трубы, ось которой совпадает с осью кольца, а радиус меньше радиуса кольца, позволяет уменьшить в области вывода величину r -компоненты внешнего поля, не изменяя существенно значения B_z . В этой же работе приведены форму-

лы, позволяющие получить распределение поля с учетом идеально проводящей трубы, бесконечной в аксиальном направлении. Влияние такой трубы на распределение поля в области вывода кольца на радиусе 0,045 м представлено в табл. 3, где указано: B_r^b - r -компонента внешнего поля, рассчитанная по формуле (1), B_r^{T1} , B_r^{T2} - поля, учитывающие влияние трубы радиуса 0,035 и 0,040 м соответственно. Как видно из таблицы, в области $0 \leq z \leq 0,1$ радиальная компонента поля с внесением трубы уменьшается сущест-

Таблица 3

Влияние идеально проводящей трубы, бесконечной в аксиальном направлении на распределение поля в области вывода кольца

Z	B_r^b	B_r^{T1}	B_r^{T2}	B_r^c
0	$1,326 \cdot 10^{-3}$	$5,72 \cdot 10^{-4}$	$3,01 \cdot 10^{-4}$	0
4	$7,37 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-4}$	$-7,61 \cdot 10^{-4}$
8	$2,83 \cdot 10^{-3}$	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$9,47 \cdot 10^{-5}$	$-1,50 \cdot 10^{-4}$
12	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$-1,31 \cdot 10^{-5}$	$-1,39 \cdot 10^{-5}$	$-2,19 \cdot 10^{-4}$
16	$-1,65 \cdot 10^{-3}$	$-2,45 \cdot 10^{-5}$	$-1,68 \cdot 10^{-5}$	$-2,81 \cdot 10^{-4}$
20	$6,80 \cdot 10^{-4}$	$-2,11 \cdot 10^{-5}$	$-2,77 \cdot 10^{-5}$	$-3,34 \cdot 10^{-4}$
24	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-6}$	$-2,95 \cdot 10^{-6}$	$-3,93 \cdot 10^{-4}$
28	$-7,42 \cdot 10^{-4}$	$-6,72 \cdot 10^{-6}$	$-7,14 \cdot 10^{-6}$	$-3,92 \cdot 10^{-4}$
32	$-6,56 \cdot 10^{-4}$	$-6,94 \cdot 10^{-6}$	$-5,93 \cdot 10^{-6}$	$-4,05 \cdot 10^{-4}$
36	$4,02 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$-4,69 \cdot 10^{-6}$	$-3,93 \cdot 10^{-4}$
40	$-1,00 \cdot 10^{-3}$	$-8,36 \cdot 10^{-6}$	$-6,52 \cdot 10^{-6}$	$-3,59 \cdot 10^{-4}$
44	$-7,23 \cdot 10^{-4}$	$-6,71 \cdot 10^{-6}$	$-5,52 \cdot 10^{-6}$	$-3,03 \cdot 10^{-4}$
48	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$8,40 \cdot 10^{-6}$	$4,36 \cdot 10^{-6}$	$-2,27 \cdot 10^{-4}$
52	$4,62 \cdot 10^{-4}$	$-4,22 \cdot 10^{-6}$	$-3,25 \cdot 10^{-6}$	$-1,33 \cdot 10^{-4}$
56	$-8,89 \cdot 10^{-4}$	$-5,86 \cdot 10^{-6}$	$-3,70 \cdot 10^{-6}$	$-2,41 \cdot 10^{-4}$
60	$6,76 \cdot 10^{-4}$	$4,91 \cdot 10^{-6}$	$3,55 \cdot 10^{-6}$	$9,47 \cdot 10^{-5}$
64	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$2,74 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	$3,18 \cdot 10^{-4}$
68	$5,72 \cdot 10^{-4}$	$4,81 \cdot 10^{-6}$	$4,04 \cdot 10^{-6}$	$3,39 \cdot 10^{-4}$
72	$7,12 \cdot 10^{-4}$	$6,74 \cdot 10^{-6}$	$5,50 \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$
76	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$4,42 \cdot 10^{-6}$	$4,92 \cdot 10^{-6}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$
80	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$3,49 \cdot 10^{-6}$	$4,77 \cdot 10^{-6}$	$6,41 \cdot 10^{-4}$
84	$9,64 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$	$7,10 \cdot 10^{-4}$
88	$-4,63 \cdot 10^{-4}$	$4,07 \cdot 10^{-6}$	$5,63 \cdot 10^{-6}$	$7,59 \cdot 10^{-4}$
92	$3,73 \cdot 10^{-4}$	$4,91 \cdot 10^{-6}$	$6,42 \cdot 10^{-6}$	$7,90 \cdot 10^{-4}$
96	$-1,13 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-6}$	$5,41 \cdot 10^{-6}$	$8,04 \cdot 10^{-4}$
100	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$8,26 \cdot 10^{-6}$	$8,56 \cdot 10^{-6}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$

венно, в хорошем согласии с формулой (5)^{12/}. Удовлетворительное согласие имеет место и для $0,6 \text{ м} \leq z \leq 1 \text{ м}$. Подъем B_r^{T1} и B_r^{T2} в этой области обусловлен r -компонентой постоянного поля, на которое труба не влияет. Распределение постоянного поля $B_r^{(5)}$ в области вывода также представлено в табл. 3.

В области $0,1 \text{ м} < z < 0,5 \text{ м}$ ослабление поля при внесении трубы оказалось примерно в 3 раза слабее ожидаемого. Модельные задачи показали, что это связано с неравномерным распределением токов по длине трубы (оно повторяет распределение внешнего поля). Наведенные токи в левой части трубы ($z < 0,1 \text{ м}$) больше токов в ее правой части ($z > 0,1 \text{ м}$). Это приводит к смещению точек перехода через нуль суммарного поля и уменьшает эффект экранирования в тех точках, где сама амплитуда радиального внешнего поля мала.

Значение B_r -компонент поля в области вывода при наличии трубы не превышает 10^{-3} Т , что сравнимо с точностью расчета полей с учетом вихревых токов, и дальнейшую коррекцию градиентов поля нужно проводить после выяснения реальной структуры поля (магнитных измерений), определения координат и амплитуд его локальных неоднородностей.

В заключение авторы выражают благодарность Н.Б.Рубину за полезные обсуждения и Л.Г.Игнатовой за помощь в оформлении работы.

Литература

1. В.И.Векслер и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3440-2, Дубна, 1968.
2. И.В.Кожухов и др. Препринт ОИЯИ, 9-4715, Дубна, 1969.
3. И.Габанец и др. Препринт ОИЯИ, Р9-8353, Дубна, 1974.
4. D. Keef et al. Nuclear Instruments and Methods, 93, 541-556 (1971).

5. Л.С.Барабаш и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
6. В.М.Жабицкий и др. Препринт ОИЯИ, Р9-8354, Дубна, 1974.
7. Г.А.Иванов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-6983, Дубна, 1973.
8. В.Смайт. Электростатика и электродинамика. М., ИЛ, 1954.
9. Ю.С.Дерендяев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-8486, Дубна, 1974.
10. Ю.С.Дерендяев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-6003, Дубна, 1971.
11. Ю.С.Дерендяев. Депозированное сообщение ОИЯИ, Б1-9-9092, Дубна, 1975.
12. В.М.Жабицкий и др. Препринт ОИЯИ, Р9-7679, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 сентября 1975 года.