

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



3612/2-76

P9 - 9848

С 345Г1
Б-235

В.Ц.Банчев, С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский,
Н.Л.Заплатин

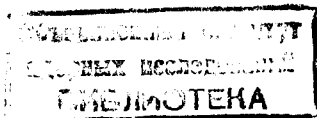
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СУПЕРЦИКЛОТРОНА

1976

P9 - 9848

В.Ц.Банчев, С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский,
Н.Л.Заплатин

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СУПЕРЦИКЛОТРОНА



Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ в течение последнего десятилетия ведет научно-исследовательскую работу по созданию сильноточных протонных циклических ускорителей на энергию 700–900 МэВ. Для ускорения интенсивного протонного пучка 10–100 мА с энергией 800 МэВ в Лаборатории был предложен новый тип ускорителя – циклотрон с жесткой фокусировкой (суперциклотрон)^{/1/+2/}.

На рис. I представлен вид ускорителя сверху^{/3/}. Магнитная система машины состоит из $N=8$ С – образных магнитов со спиральными полюсными наконечниками. Между магнитами располагается 4 ВЧ резонатора. Инжекция на орбиту с радиусом $r_H=2,4$ м осуществляется от линейного ускорителя непрерывного действия на энергию протонов 50 МэВ. Вывод частиц при 100%-ной эффективности с орбиты радиуса $r_K=6,95$ м достигается за счет эффекта расширения замкнутых орбит в периодических магнитных полях^{/4/}.

В данной работе преимущественно рассматривается создание магнитной системы ускорителя. Магнитная система должна быть спроектирована так, чтобы на медианной плоскости в диапазоне рабочих радиусов азимутально-среднее магнитное поле приблизительно имело вид:

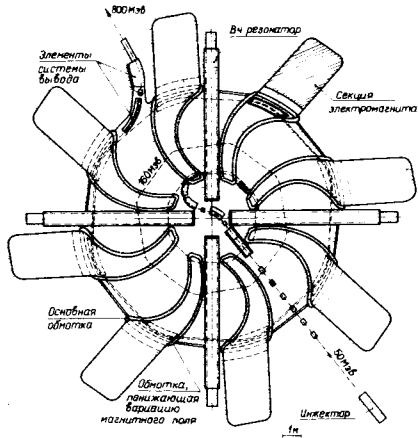


Рис.1. Общий вид суперциклотрона (план).

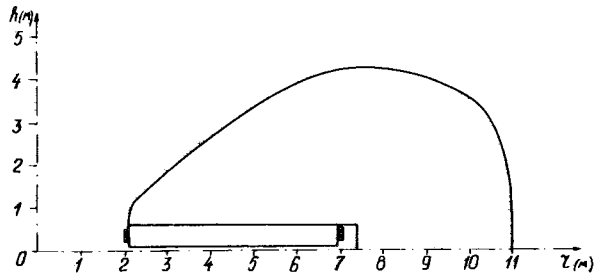


Рис.2. Радиальное сечение магнита.

$$\bar{B}(z) \approx \frac{B_0 \cdot \tau}{\sqrt{1 - \left(\frac{z \cdot \tau}{z_0}\right)^2}}, \quad (1)$$

где параметр $B_0 = 4050$ Гс. Циклотронный радиус $z_0 = 7,7273$ м. Поправку τ к $\bar{B}(z)$, возникающую за счет пространственной вариации магнитного поля и необходимую для обеспечения условия изохронности

$$f \equiv (6,175) \text{ МГц}, \quad (2)$$

где f - частота обращения частиц, можно учесть путем расчетов траекторий в поле вида

$$B(z, \varphi) = \bar{B}(z) \left[1 + \sum_{k=1}^m \epsilon_{kN}(z) \cdot \cos kN(\varphi - \varphi_{kN}) \right]. \quad (3)$$

Частота свободных вертикальных колебаний частиц (без учета эффекта пространственного заряда) должна удовлетворять условию

$$Q_z \equiv 1,35 \pm 0,05. \quad (4)$$

Для расчета геометрии полюсного наконечника магнита использовалась двумерная сеточная методика с последующим восстановлением трехмерной конфигурации магнитного поля в соответствии с работой /5/. В процессе серии изменений параметров полюса магнита был найден один из возможных вариантов геометрии, удовлетворяющий с точностью проведения расчетов требованиям к магнитному полю. Здесь необходимо упомянуть, что на размеры полюсного наконечника накладывалось определенное ограничение, связанное с необходимостью отведения свободного промежутка между двумя магнитами шириной 60 см для резонатора ВЧ. В качестве исходных данных при выборе формы полюса были приняты данные /3/. Средняя линия полюса состоит из двух сопряженных на радиусе S_c дуг окружностей. Уравнение средней линии можно записать в виде

$$\varphi_c(z) = \varphi_H - \theta_0 + \alpha z \cos \frac{z^2 + C_H^2}{2zC_0}, \quad (5)$$

где

$$C_0 = \sqrt{C_H^2 + \left(\frac{z_T^2 - C_H^2}{2z_T \cos \alpha_T} \right)^2}, \quad (6)$$

$$z_T = R_H, \quad \alpha_T = \alpha_H \quad \text{при} \quad z < C_H,$$

$$z_T = R_K, \quad \alpha_T = \alpha_K \quad \text{при} \quad z \geq C_H,$$

$$\theta_0 = \alpha z \cos \frac{C_H}{C_0}. \quad (7)$$

Угловой размер полюса был задан в виде

$$\Delta\varphi = Az^2 + Bz + D. \quad (8)$$

Найденные в результате расчета параметры полюса сведены в таблицы I и II.

Таблица I

$\varphi_H = 45^\circ$	$C_H = 4,0 \text{ м}$
$R_H = 2,4 \text{ м}$	$\alpha_H = 118^\circ$
$R_K = 6,65 \text{ м}$	$\alpha_K = 38^\circ$
$A = 0,875 \text{ град/м}^2$	$B = -6,45 \text{ град/м}$
$D = 22,5711 \text{ град}$	

Таблица II

$z \text{ (м)}$	2,4	3,4	4,4	5,4	6,4
$\Delta\varphi^\circ$	12,1	10,8	11,1	13,3	17,1

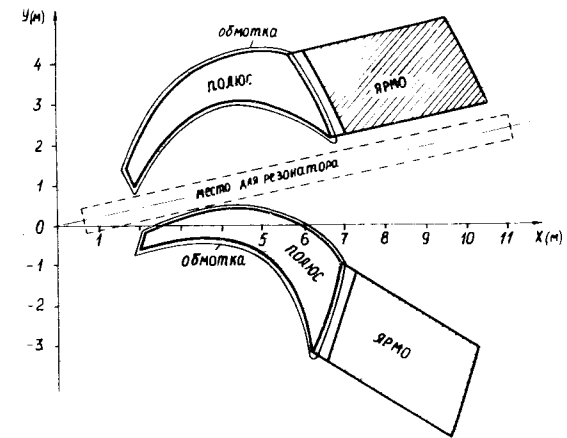


Рис.3. Два соседних магнита (план).

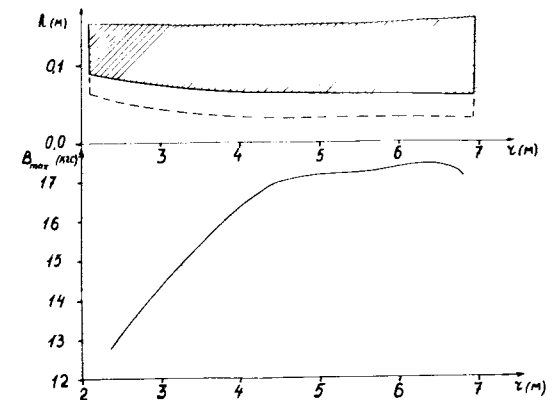


Рис.4. Радиальное распределение максимального поля.

Радialное сечение магнита, а также расположение двух магнитов (план) представлены на рис. 2 и 3. Ввиду упоминавшегося выше геометрического ограничения на азимутальный размер области расположения полюса оказалось невозможным сформировать среднее поле при плоском зазоре между полюсами. В расчетах рассматривались магниты с двумя вариантами минимального зазора: $2h_{1min}=12$ см и $2h_{1min}=6$ см. Не отвергая совсем второй вариант, нужно сказать, что при уменьшенном зазоре сильно возрастают требования на точность выполнения профиля $2h_1(z)$ в условиях жестких требований формирования изохронного среднего поля. Кроме того, при $2h_{1min}=60$ см возрастает по величине нелинейные компоненты магнитного поля в области циркулирующего пучка^{/6/}. В связи с вышеизложенным все дальнейшее относится к варианту $2h_{1min}=12$ см. В таблице III дана найденная зависимость полузазора от радиуса, отвечающая требованиям к магнитному полю.

Таблица III

r (м)	2,1	2,225	2,35	2,475	2,6	2,79
h_1 (см)	8,4	8,2	8,0	7,9	7,8	7,6
z (м)	2,98	3,17	3,36	3,55	3,74	3,93
h_1 (см)	7,2	7,0	6,8	6,6	6,5	6,3
z (м)	4,12	4,31	7,0			
h_1 (см)	6,2	6,0	6,0			

На рис. 4 представлено распределение поля по средней линии полюса для указанного зазора. Оценки показали, что для возбуждения магнита необходимы $JW \approx 10^5$ А·в для каждой половины основной обмотки. На рис. 5 изображено распределение магнитного поля

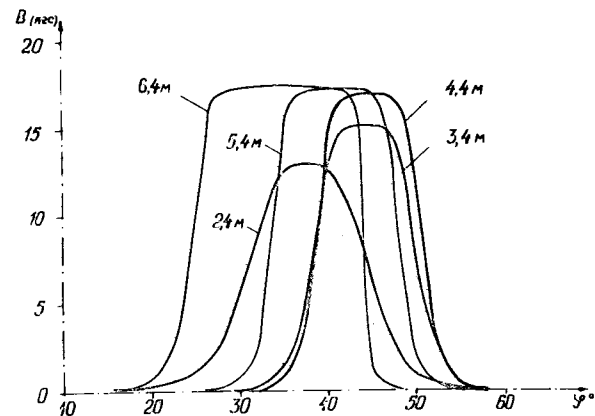


Рис. 5. Распределение поля в медианной плоскости.

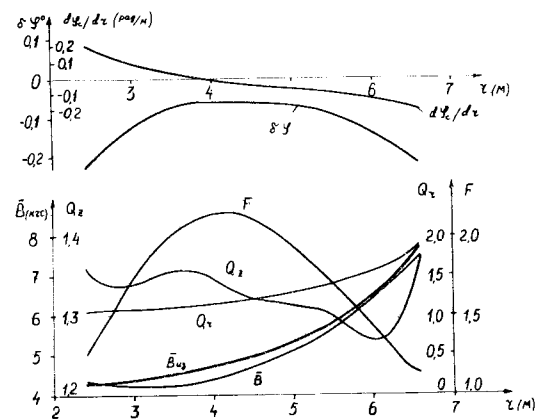


Рис. 6. Анализ полученного поля.

в плоскости $Z=0$ магнита, восстановленное на основе расчетов радиального и азимутального сечений.

Результаты расчета среднего магнитного поля \bar{B} , флаттера F , отклонения фазы максимума N -ной гармоники от средней линии полюса

$$\delta\varphi = \varphi_N - \varphi_c(z), \quad (9)$$

частот свободных колебаний

$$Q_z \approx \sqrt{1+n}, \quad (10)$$

$$Q_z = \sqrt{-n+F \left[1+2 \left(z \cdot \frac{d\varphi_N}{dz} \right)^2 \right]}, \quad (11)$$

где ввиду малости $\delta\varphi$ считалось

$$\frac{d\varphi_N}{dz} \approx \frac{C_N^2 - z^2}{z \cdot \sqrt{4C_0^2 z^2 - (z^2 + C_N^2)^2}}, \quad (12)$$

и показатель поля вычислялся по

$$n = \frac{z^2}{z_0^2 - z^2}, \quad (13)$$

приведены на рис.6.

Возможность применения (10), (11) для расчета частот Q_z, Q_z основана на результатах работы [7], где найдено, что погрешность указанных формул по сравнению с траекторными расчетами не превышает $|\Delta Q_z| < 0,05$, $|\Delta Q_z| < 0,01$.

Как видно из рис.6, созданное среднее поле находится с точностью $\pm 1\%$ вблизи требуемого, частота вертикальных свободных колебаний при условии, что среднее поле имеет вид (I), лежит в пределах $1,27 \leq Q_z \leq 1,36$. На рис.7 представлены результаты траекторных расчетов в полученном магнитном поле. В левой части рисунка

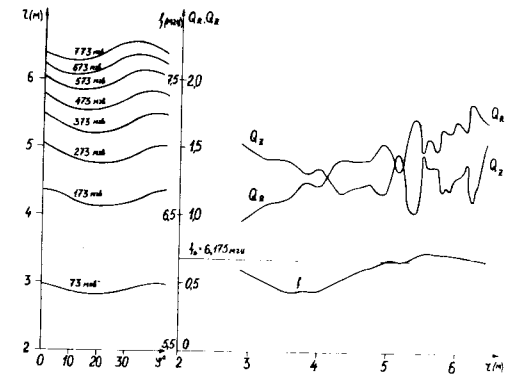


Рис.7. Анализ поля при помощи расчетов траекторий.

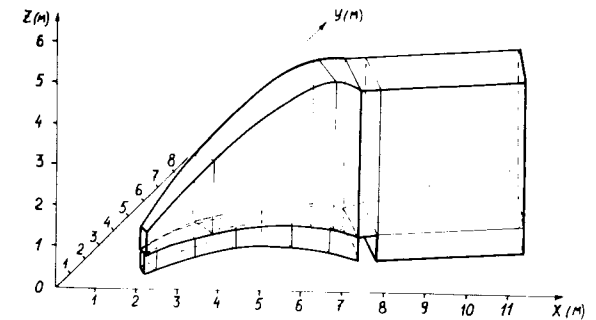


Рис.8. Разбиение на многогранники магнита СЦ.

изображены равновесные орбиты на периоде магнитной системы для диапазона энергий ускорителя, в правой части - зависимость от радиуса частоты обращения частиц, постоянство которой обеспечивается с точностью $\Delta f = \pm 0,20$ МГц, и кривые частот Q_z, Q_z .

Расчеты секторного магнита СЦ методом сеток в двумерном приближении обладают рядом недостатков. В частности, оказывается невозможной оценка поля вблизи начального и конечного радиусов. Ввиду известной неопределенности значения ампервитков обмотки возбуждения затруднителен выбор оптимальной конфигурации ярма магнита. В связи с этим возникает необходимость трехмерного расчета магнитного поля системы. В нашем случае была сделана попытка применить для расчета метод интегральных уравнений^{/9/}. На рис. 8 представлена упрощенная конфигурация магнита СЦ с постоянным зазором $2h_1 = 12$ см, разделенная для расчета на 12 многогранников с однородной намагниченностью в каждом из них. Результат расчета при $NI = 10^5$ Ав был получен за 40 мин времени центрального процессора СДС-6400 через 219 итераций. Максимальное значение магнитного поля в medianной плоскости при $Z = 0$ и азимутальные распределения полей для различных радиусов представлены на рис. 9. Как видно из рисунка, максимальное расчетное поле получилось почти в 2 раза меньше ожидаемого, а азимутальные распределения, особенно для радиуса $Z = 6,5$ м, имеют искаженный характер. Наблюдаемые эффекты, по-видимому, связаны с очень малым для данного магнита числом многогранников разбиения. Расчет подобного магнита со столь малым рабочим зазором и сильно неоднородным распределением намагниченности в теле магнита возможен с точностью до единиц процентов лишь на ЭВМ класса СДС 7600.

Для оценки числа полюсных обмоток тонкой коррекции и диапа-

Таблица IV

№ об. случай	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	I	526	600	656	III	I36	I30	I30	III	II5	78	I58	20	-II8
	2	314	363	394	-I05	-I24	-II3	-50	26	I3I	I26	-I94	-693	-49I
№ об. случай	I5	I6	I7	I8	I9	20	2I	22	23	24	25			
	I	-2I3	-I86	-I42	-8I	-5	72	I37	200	270	338	382		
	2	-I9	383	483	276	-60	-320	-405	-32I	-I57	-37	I		
№ об. случай	26	27	28	29	30	3I	32	33	34	35	36			
	I	I9	23	I9	I7	I6	I4	I3	7	20	24			
	2	-7	-I5	-27	-32	-27	-20	-I0	-I	8	-9			

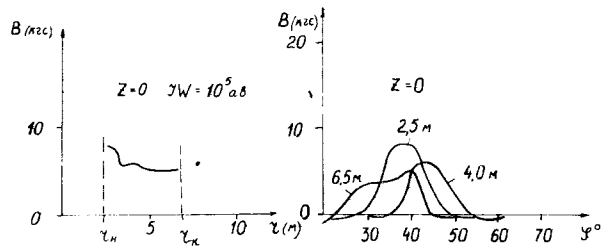


Рис.9. Результаты расчета методом интегральных уравнений.

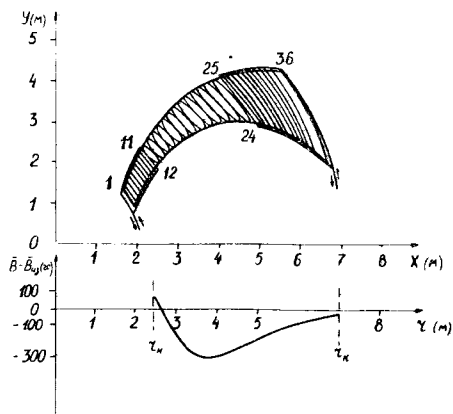


Рис.10. Полюсные обмотки (план).

зона требуемых ампервитков были сделаны расчеты коррекции отклонения среднего магнитного поля (рис.6). В расчетах рассматривались аналогично /10/ два типа полюсных обмоток (рис.10 и 11). Распределения полей этих обмоток в медианной плоскости вычислялись с учетом /2 отражений в полюсе. Определение значений ампервитков обмоток для коррекции двух типов распределений отклонений среднего поля

$$\Delta \bar{B}_1(z) = K \cdot [\bar{B}(z) - \bar{B}_{\text{изопр.}}(z)] \quad \text{и} \quad (14)$$

$$\Delta \bar{B}_2(z) = K \cdot [\bar{B}(z) - \bar{B}_{\text{изопр.}}(z)] \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6G} z\right) \quad (15)$$

(где $G = 0,14$ м, $\bar{B}(z) - \bar{B}_{\text{изопр.}}(z)$ приведено на рис.10, $K=0,1$ - множитель, используемый для получения остаточного среднего поля на уровне десятков гаусс) производилось методом МНК с регуляризацией в соответствии с работой /11/. Максимальное остаточное отклонение поля в первом случае было 1,2 Гс, во втором - 3,8 Гс. Интервал радиусов наблюдения составлял $z = 2,4$ м + 6,65 м с шагом 0,05 м. Полученные значения ампервитков для обоих случаев сведены в таблицу IV.

В заключение необходимо отметить, что в проведенных расчетах рассматривалась изолированная С-магнит системы. Для учета взаимного влияния магнитов ускорителя необходимо провести расчет методом сеток азимутальных сечений 3-х рядом расположенных магнитов. Как видно из работы /12/, эффект взаимного влияния магнитов проявляется в изменении уровня поля на величину ≈ 100 Гс, что может быть легко скомпенсировано изменением тока возбуждения магнитов.

Результаты данной работы могут служить основой для выбора

параметров модельного магнита при моделировании рассчитанного варианта конфигурации. При возникновении необходимости в других наборах параметров системы они могут быть получены на основании метода, изложенного в данной работе. Кроме того, двумерные сеточные расчеты позволят при экспериментальном моделировании определять нужное направление изменения геометрии. С помощью этих расчетов возможно определение размеров и положения магнитных элементов тонкой коррекции (например, шимм по боковым границам полюса).

Авторы выражают глубокую благодарность В.В.Кольга за многократные обсуждения затронутых в работе вопросов.

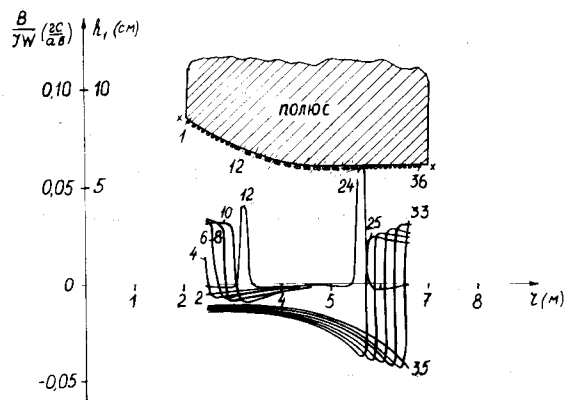


Рис.11. Распределения полей полюсных обмоток.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П.Джелепов и др. Материалы Международной конференции по изохронным циклотронам, Гатлинбург, США, 1966, стр.215.
2. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга, ОИЯИ,Р9-7833, Дубна,1974.

3. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, В.В.Кольга . ОИЯИ,Р9-9066, Дубна, 1975.
4. А.Т.Vasilenko et al. Е9-8443, ОИЯИ, Дубна, 1974.
5. С.Б.Ворожцов. Расчет С-образного магнита методом сеток. Сообщение ОИЯИ, Р9-9216, Дубна, 1975.
6. P.A.Tschopp, H.A.Willax. Proc.of the Int.Conf.on Magnet Technol. Oxford, 1967, p.262.
7. W.Joho. SIN- Report TM-11-07, 1970.
8. С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга. Сообщение ОИЯИ, Р9-7954, Дубна, 1974.
9. V.Тs.Banchev, S.B.Voroshtsov. On the Computation of Three-Dimensional Magnetostatic Fields by the Integral Equation Method. (Abstract). Conf.on the Comp.of Mag.Fields.Oxford,1976.
10. H.A.Willax. Proc.of the 1972 Cyclotron Conf. Vancouver, 1972, p.114.
11. Л.Л.Зиновьева, Е.П.Жуков, Н.Б.Рубин. Сообщение ОИЯИ, Р9-7580, Дубна, 1973.
12. SIN. Tatigkeitsbericht,1972, p.11.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июня 1976 года.