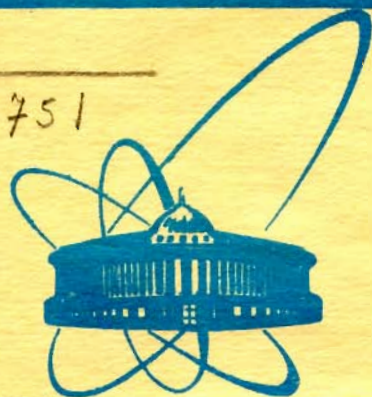


B-751



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

5350/2-79

24/12-79
P9 - 12630

С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЦИКЛОТРОНА
СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ
МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

1979

P9 - 12630

С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин

**РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЦИКЛОТРОНА
СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ
МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л.

P9 - 12630

Расчет магнитной системы циклотрона со сверхпроводящими обмотками методом интегральных уравнений

Изложены результаты расчета полной секторной магнитной структуры циклотрона на сверхпроводимости для ускорения многозарядных ионов в области энергий 300-400 МэВ/нуклон. Расчет проводился методом векторного интегрального уравнения в трехмерном пространстве с учетом эффектов насыщения железа. На основании расчетов были существенно изменены параметры магнитной системы ускорителя II ступени циклотронного комплекса для ускорения многозарядных ионов до релятивистских энергий. В работе также проведено сравнение путем численного анализа броневой и секторной структур циклотрона на сверхпроводимости.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Vorozhtsov S.B., Zaplatin N.L.

P9 - 12630

Calculation of Magnetic System of the Cyclotron with Superconducting Coils by the Integral Equation Method

The results of calculation of full sector magnetic system of a cyclotron on the base of superconductivity for acceleration of multi-charge ions up to the 300-400 MeV/n energy are presented. The calculations have been performed by the vector integral equation method in three dimensions taking into account the iron saturation effects. On the base of calculations, the parameters of a second stage cyclotron complex magnetic system were changed. The comparison by means of numerical analysis of the sector and armoured cyclotron structures with superconductivity is also done.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Для ускорения многозарядных ионов в области энергий 300-400 МэВ/нуклон наиболее оптимальными являются циклотронные установки на базе сверхпроводящих магнитов /1/.

Численный анализ методом интегральных уравнений /2/ применяемой в настоящее время для циклотронов на сверхпроводимости /3,4,5/ броневой магнитной системы с концентрической обмоткой (рис.1) показывает, что величина достигаемого значения флаттера (рис.2) слишком мала для получения устойчивого аксиального движения в зоне конечных радиусов ускорителя на указанные выше энергии. Среднее магнитное поле броневой магнитной системы при одинаковых уровнях возбуждения обмотки значительно выше, чем у аналогичной по железу системы с секторными обмотками типа предлагаемых в работе /1/ для циклотрона II ступени. Уменьшение угловой протяженности секторных накладок в два раза приводит к незначительному изменению флаттера. Поэтому единственной возможностью для получения достаточной жесткости по вертикальным свободным колебаниям ($0,5 < Q_z < 1,0$ или $1,0 < Q_z < 1,5$) для удержания в режиме ускорения интенсивных пучков ионов в циклотроне II ступени является выбранная в работе /1/ секторная структура магнитной системы с секторными сверхпроводящими обмотками.

Вследствие заметного взаимного влияния по магнитному полю секторных магнитов со сверхпроводящей обмоткой /6/ оказалось необходимым провести численный анализ магнитной системы циклотронной установки II ступени с учетом этого эффекта. Кроме того, сравнение распределений магнитного поля в медянной плоскости ускорителя, полученных на основании предположения о постоянстве намагниченности отдельных частей железа магнита ($4\pi M = const$), как это было принято в работе /1/, с результатами метода интегральных уравнений

указывает на некоторое расхождение данных как по уровню возбуждения обмотки (25%), так и по характеру кривых (рис. 3-4).

На основании расчетов системы трех рядом расположенных секторных магнитов оказалось, что без заметного влияния на величину (~4%) требуемых ампервитков габариты магнитов могут быть значительно уменьшены. Такой результат связан с обнаруженным замыканием значительной части магнитного потока не через обратное ярмо, а через межсекторное пространство, в том числе и вне зоны рабочих радиусов (рис. 5).

Расчетное формирование необходимых флаттера F и среднего магнитного поля \bar{B} для ускорения U_{73}^{238} производилось при полной 6-секторной структуре магнитной системы (рис. 6). В силу симметрии системы намагниченность железа определялась лишь в 1:24 части объема железа. Токвые обмотки на рис. 6 для наглядности изображения приведены в плане для 1:2 системы. В процессе формирования варьировались, в основном, радиальная зависимость угловой протяженности полюсной накладки с плотно прилегающей к ней секторной обмоткой от радиуса (параметры $d_{\text{П}}$, $d_{\text{Н}}$, $d_{\text{К}}$; рис. 7), уровень возбуждения обмоток (IW) и положение обмотки относительно медианной плоскости системы (h_c). Значения этих параметров на различных этапах формирования представлены в таблице I. Процесс сходимости параметров к требуемым величинам можно проследить по рис.8. На рис. 9-12 представлены результаты этих расчетов для указанных изменений параметров системы. Наибольшую трудность вызывает получение требуемого значения F в пределах кривых, соответствующих $Q_z = 1$ и $Q_z = 1,5$ в начале и в конце рабочего диапазона радиусов. При этом среднее поле \bar{B} должно находиться вблизи изохронной зависимости.

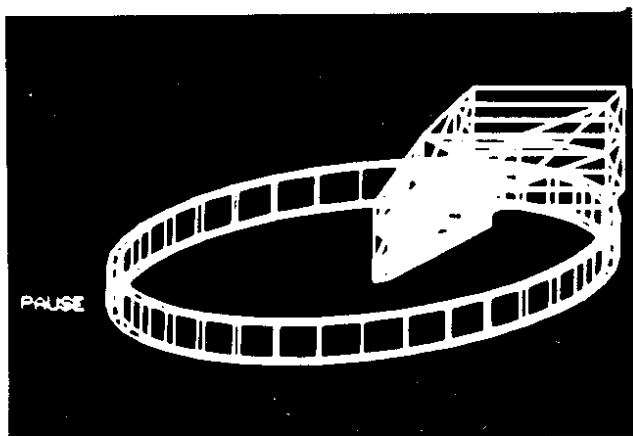


Рис.1. Изображение на дисплее расчетной модели броневой магнитной системы.

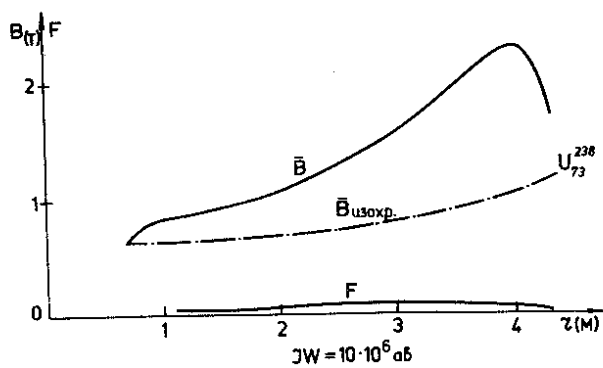


Рис.2. Магнитное поле броневой системы.

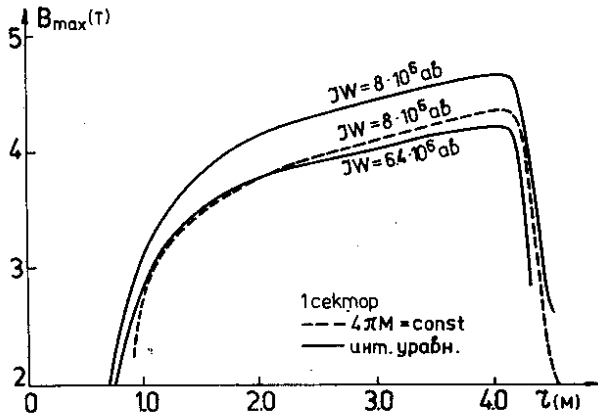


Рис.3. Поле в "холме" для одного сектора.

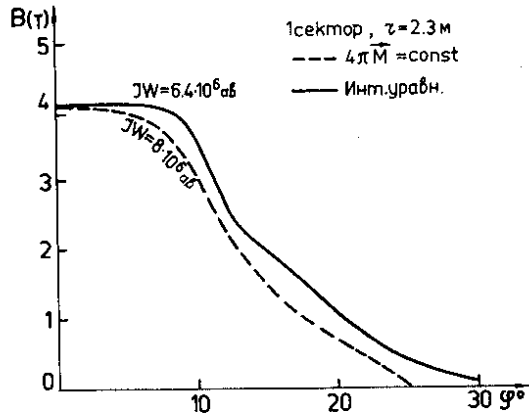


Рис.4. Азимутальные распределения поля.

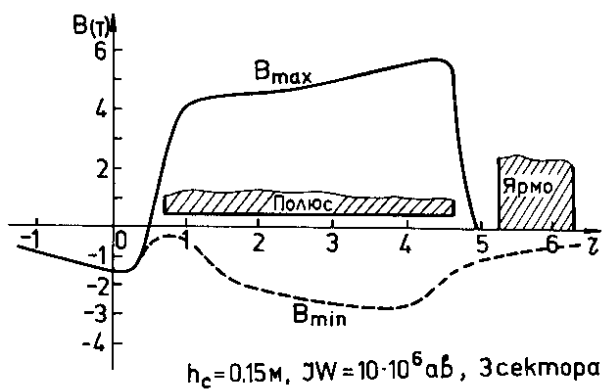


Рис.5. Поле в "холме" и "долине" для системы трех соседних секторов.

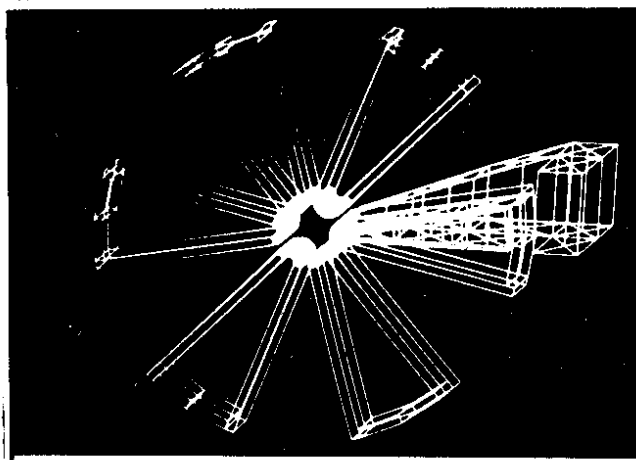


Рис.6. Изображение на дисплее расчетной модели 6-секторной магнитной системы.

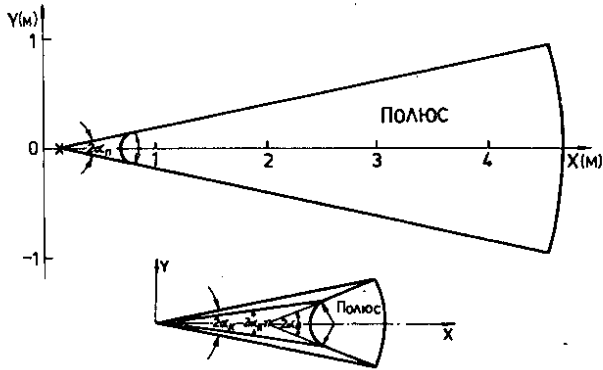


Рис.7. Геометрия полюсного наконечника.

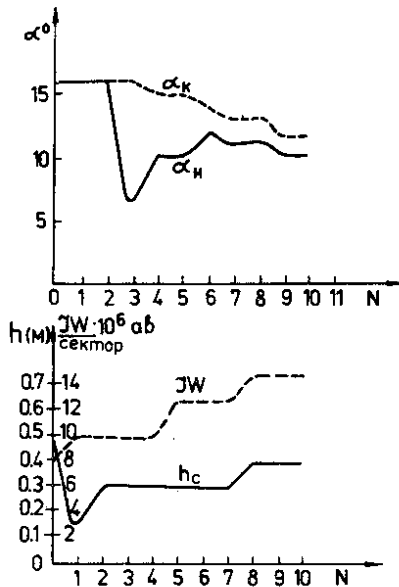


Рис.8. Динамика изменения параметров в процессе формирования поля.

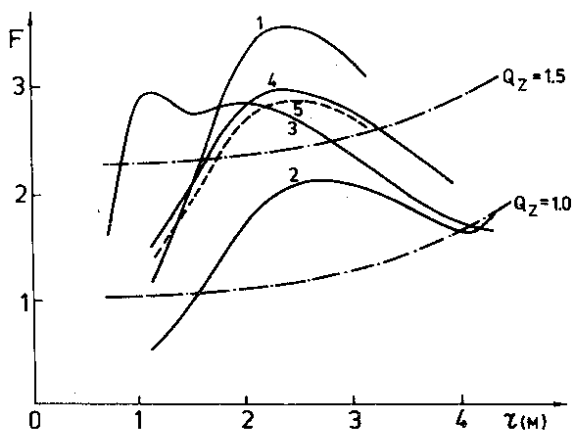


Рис.9. Флаттер в расчетах N I+5.

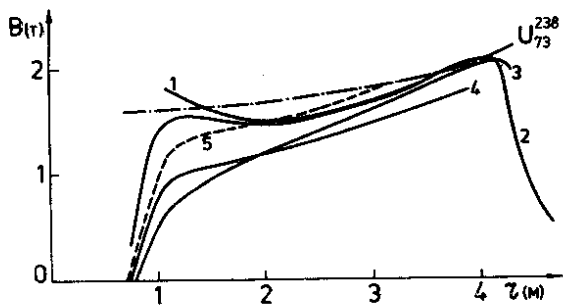


Рис.10. Среднее поле в расчетах N I+5.

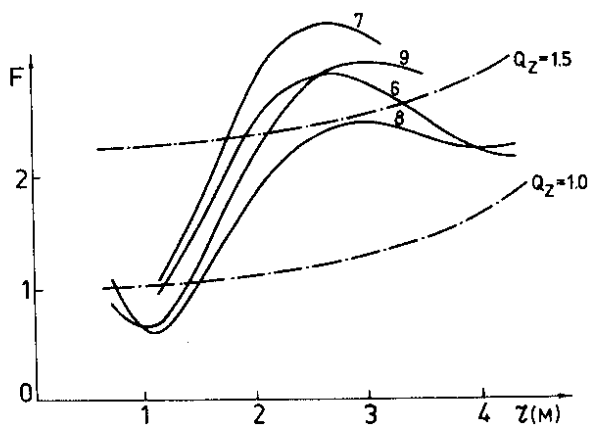


Рис. II. Флаттер в расчетах N 6+9.

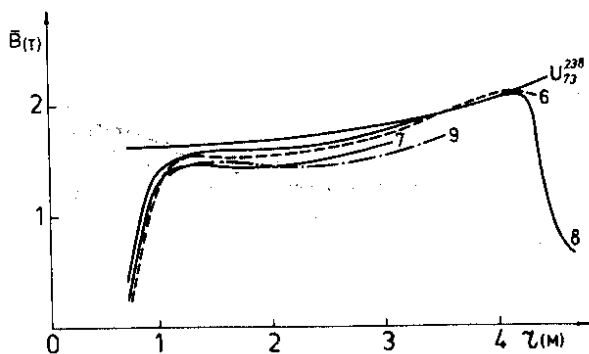


Рис. I2. Среднее поле в расчетах N 6+9.

Таблица I.

№№	h_c (м)	d_n (град.)	d_n (град.)	d_k (град.)	$\frac{IW \cdot 10^{-6}}{\text{сектор}} \cdot \frac{1}{(A\delta)}$	h_n (м)
1	0,15	16	16	16	10	0,05
2	0,30	16	16	16	10	0,05
3	0,30	17,9	6,3	16	10	0,05
4	0,30	16	10,2	15	10	0,05
5	0,30	16	10,2	15	13	0,05
6	0,30	14,5	12	14	13	0,05
7	0,30	13,5	11,1	13,1	13	0,05
8	0,40	13,5	11,1	13,1	15	0,05
9	0,40	12	10,1	11,7	15	0,05
10	0,40	12	10,1	11,7	15	0,04

где № - номер расчета,

h_c - расстояние от обмотки до медианной плоскости,

d_n - угловая протяженность полюса,

d_n, d_k - угловые размеры полюса на начальном и конечном радиусах в системе координат ускорителя,

IW - уровень возбуждения обмоток сектора,

h_n - расстояние от полюса до медианной плоскости.

На рис.13 представлен удовлетворительный результат формирования поля при заданном наборе изменяемых параметров системы. Из этого рисунка видно, что значения F всюду, кроме начальных радиусов, находятся в требуемых пределах. Увеличение F до требуемого на начальных радиусах при сохранении F в требуемых пределах в остальной зоне возможно, как это видно из анализа кривых рис.9,II, за счет приближения обмотки в центре ускорителя к медианной плоскости. При этом среднее поле \bar{B} несколько увеличится на начальных радиусах.

Как видно из рис.13, отклонения среднего магнитного поля от требуемого не превышают $\approx 5\%$. Тонкая коррекция среднего магнитного поля может быть осуществлена либо при помощи перемещающихся стержней, как для циклотрона Чок-Ривер^{/3/}, либо при помощи токовых обмоток, как для циклотрона Мичиганского университета^{/5/}.

В таблице II представлены исходные и полученные в данной работе параметры магнитной системы циклотрона на сверхпроводимости. Наибольшие изменения, как и следовало ожидать, затрагивают величину запасенной энергии (увеличение ≈ 3 раза). Запасенная энергия циклотронной установки II ступени ускорения для ускорительного комплекса многозарядных ионов несколько больше половины запасенной энергии Большой европейской пузырьковой камеры ЦЕРНа^{/7/}. Вес магнита уменьшился более чем в 3 раза. Ампер-витки на I секторный магнит возросли приблизительно в 2 раза. Высота магнита уменьшилась \approx в 2 раза. Остальные параметры изменились на $10+35\%$. Общие виды секторного магнита в сравнении с исходной системой представлены на рис.14.

В связи с существенным изменением требуемых ампер-витков встает вопрос об увеличении конструктивного пространства, отведенного для размещения обмотки и охлаждающих ее объемов: гелиевого объема с температурой $4,2 + 4,5^{\circ}\text{K}$, азотного экрана с жидким азотом и внешней многослойной вакуумной изоляции.

Если токовая катушка наматывается однослойной металлургической проволокой HT-50^{/8/} (см. таблицу III), то для заданных IW площадь, занятая проводником, составит 400 см^2 или $\approx 25\%$ величины конструктивной площади. Это означает, что потребуются увеличение конструктивной площади обмотки по сравнению с исходным вариантом.

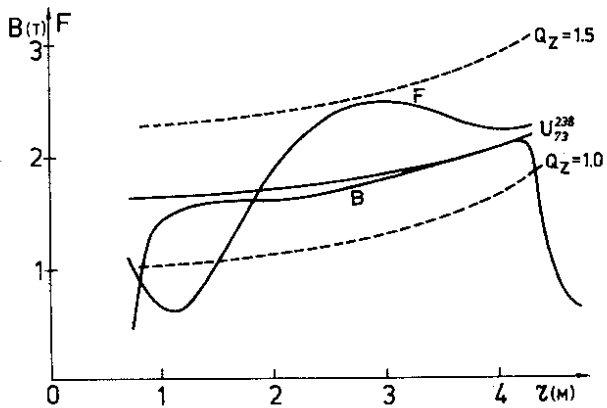


Рис.13. Полученный вариант сформированного магнитного поля.

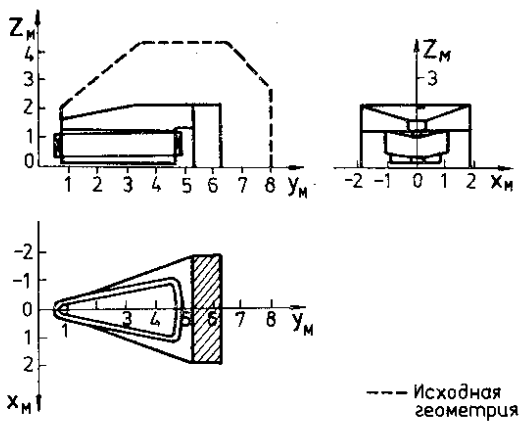


Рис.14. Общий вид секторного магнита.

Таблица П.

№№	Наименование параметра секторного магнита	Исходное значение A_0	Новое значение A_I	$\frac{A_I - A_0}{A_0}$ (%)
1	Число секторов структуры	6	6	-
2	Начальный радиус (м)	0,70	0,70	-
3	Конечный радиус (м)	4,66	4,66	-
4	Угловая протяженность полюсного наконечника (град.)	20	22-26	10-30
5	Межполюсный зазор (м)	0,10	0,10	-
6	Индукция в секторе (Т)	4,5-5,0	3,0-5,8	(-35)-(-15)
7	Высота магнита (м)	8,60	4,20	-50
8	Ширина магнита по ярму (м)	3,82	3,82	-
9	Длина магнита (м)	7,30	5,55	-25
10	Вес одного сектора (г)	1000	300	-70
11	Ампер-витки на сектор	$8 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	90
12	Мощность питания (кВт)	-	-	-
13	Запасенная энергия на сектор (мДж)	20	70	250
14	Угловая протяженность полюса (град.)	32	22-26	(-30)-(-20)
15	Угловая протяженность секторной обмотки (град.)	32	22-26	(-30)-(-20)
16	Плотность тока (A/mm^2)	25	47	90
17	Диаметр системы по ярму (м)	15,84	12,50	-20
18	Расстояние от обмотки до медианной плоскости (м)	0,35-0,50	0,30-0,40	(-15)-(-20)
19	Расстояние от горизонталь- ного ярма до медианной плоскости (м)	1,30	1,20	-10

Таблица Ш.

Параметры обмотки	Значение
Номинальный ток для U_{73}^{238}	1280 А
Вес меди / сектор	5,7 Т
Вес сверхпроводника/ сектор	1,36 Т
Сечение проводника НТ-50	3,5x2 мм ²
Отношение сечения меди к сечению сверхпроводника	4,6
Максимальное поле на проводнике	5,8 Т
Плотность тока в сверхпроводнике	850 А/мм ²
Конструктивная плотность тока в проводнике	47 А/мм ²
Число сверхпроводящих нитей одной шиммы	300
Диаметр каждой нити	0,08 мм
Длина обмотки на I сектор	117 см

Заключение

В данной работе в процессе численного формирования магнитного поля для случая $1,0 < Q_z < 1,5$ предполагалось, что токовая обмотка и полюс выполнены в форме секторов. Это геометрическое ограничение привело к большой величине необходимых ампер-витков магнитов, что вызывает трудности при конструктивном оформлении сверхпроводящей обмотки. Альтернативой рассмотренного варианта магнита является конфигурация системы со спиральными полюсами и обмотками. В этом случае можно получить необходимые характеристики поля при уменьшенных ампер-витках. Той же цели служит переход для рассмотренной конфигурации магнита к режиму $0,5 < Q_z < 1,0$.

Авторы благодарят В.П.Дмитрисовского за поддержку и внимание к работе.

Литература

1. А.А.Васильев и др. ОИЯИ, Д9-И1584, Дубна, 1978.
2. П.Г.Акишин и др. ОИЯИ, Е9-И1859, Дубна, 1978.
3. J.H.Omgrod et al. IEEE Trans.on Nucl .Sci. NS-24, No.3, 1977, p.1993
4. Blosser et al. Ann.Rep. 1975-76, Cycl.Lab.Mich. St.Univ.
5. E.Aocerbi et al. IEEE Trans.on Nucl.Sci. NS-24, No.3, 1977, p.1093
6. С.Б.Ворожцов, Н.Л.Заплатин. ОИЯИ, Е-9-И1860, Дубна, 1978.
7. Г.Брехна. Сверхпроводящие магнитные системы, "Мир", М., 1976, стр.669.
8. Yu.M.Ado et al. MT-6, Bratislava, 1977, p.563.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1979 года.