

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-2000-22

С.Б.Ворожцов, Н.А.Морозов, Э.Бакевич*, К.Даниел*,
Х.Дорух*, Р.Тарашкевич*

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ
ОБМОТОК ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА АИЦ-144

*Институт ядерной физики, Краков, Польша

2000

Для изохронного циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ, Краков, Польша) разрабатывается и вводится в эксплуатацию новая система вывода [1, 2] пучков ускоренных частиц. Для получения ее требуемых рабочих характеристик были сформированы магнитные поля циклотрона в зоне ускорения пучка для семи уровней тока основной обмотки магнита и трех типов ускоряемых частиц (протоны, дейтроны, He^{+2}), всего 13 режимов. Параметры режимов приведены в табл.1. Зависимости конечной энергии ускоренных протонов и дейтронов от тока основной обмотки магнита – на рис.1.

Таблица 1. Режимы формирования магнитного поля.

I_0 - ток основной обмотки магнита циклотрона;

B - среднее магнитное поле;

f - частота обращения частиц;

E_k - энергия ускоренных частиц на конечном радиусе

№	Тип частицы	I_0 , А	B , Тл	f , МГц	E_k , МэВ
1	p	570	1,8	26,6	60
2	p	385	1,68	24,4	50
3	p	285	1,6	23,3	46
4	p	155	1,28	19	30
5	p	120	1,08	16,2	22
6	d	582	1,8	13,6	30
7	d	285	1,6	12,1	22
8	d	198	1,43	10,8	18
9	d	161	1,3	10	16
10	He^{+2}	582	1,8	13,6	60
11	He^{+2}	285	1,6	12,1	44
12	He^{+2}	198	1,43	10,8	36
13	He^{+2}	161	1,8	10	32

Формирование требуемых магнитных полей циклотрона осуществляется при помощи 20 пар токовых концентрических обмоток. Их расположение в структуре магнитной системы циклотрона АИЦ-144 показано на рис.2. Магнитные поля токовых обмоток в значительной степени зависят от уровня магнитного поля, задаваемого основной обмоткой магнита. Поэтому для

каждого из семи значений тока основной обмотки магнита циклотрона должны быть получены таблицы полей concentрических обмоток. Экспериментальные измерения магнитного поля обмоток были использованы в минимальном объеме. Основная часть таблиц полей обмоток была получена расчетным путем при использовании нормирования результатов расчетов на экспериментальные данные.

Были проведены следующие измерения магнитного поля concentрических обмоток:

- измерения полей всех 20 обмоток для $I_0=600$ А ($R=0 - 60$ см) ;
- измерения полей обмоток 2, 11, 19 для $I_0=120, 170, 285, 570$ А ($R=0 - 60$ см);
- измерения полей всех 20 обмоток на радиусе $R=0$ при токах $I_0=100, 120, 150, 170, 200, 250, 285, 350, 400, 450, 500, 570, 600$ А.

Поля обмоток в центре циклотрона ($R=0$)

При измерении полей обмоток значительное влияние на точность измерений, особенно при низких значениях магнитного поля (1–1,3 Тл), оказывают гистерезисные эффекты. На рис.3 приведены поля всех обмоток на $R=0$ для $I_0=120$ А при максимальном значении тока в них $I_k=400$ А (для систематизации результатов поля обмоток 12 - 16 увеличены в 1,333 раза). В случае случайной последовательности измерения этих полей (кривая 1) ошибка измерения - более 1 мТл и достаточно трудно по этим измерениям получить адекватную аппроксимирующую зависимость. При систематической последовательности измерения (последовательно начиная с обмотки самого большого радиуса) точность измерения на порядок выше (кривая 2) и аппроксимирующая зависимость легко может быть построена. На рис.4 и 5 приведены все измеренные поля concentрических обмоток в центре циклотрона ($R=0$).

Таблицы полей concentрических обмоток для $I_0=600$ А

Магнитные поля для всех 20 обмоток были получены путем их измерений на начальной стадии работы с магнитной системой циклотрона. В дальнейшем в магнитную систему циклотрона были внесены дополнительные изменения, что привело к изменению

полей концентрических обмоток на величину, достигающую значения 0,4 мТл. Характер изменений полей был определен экспериментальным путем для обмоток 2, 11, 19. Для всех остальных обмоток изменения были рассчитаны методом интерполяции этих экспериментальных данных. Окончательная коррекция полей обмоток была осуществлена расчетным способом при помощи измеренных полей всех обмоток на $R=0$. Окончательные зависимости от радиуса магнитных полей для всех концентрических обмоток при токе основной обмотки магнита $I_0=600$ А приведены на рис.6.

Таблицы полей концентрических обмоток для $I_0=570$ А

Таблицы магнитных полей для этого значения тока основной обмотки магнита были получены путем интерполяции таблиц полей для $I_0=600$ А с использованием экспериментальных зависимостей для $R=0$. Поля всех обмоток приведены на рис.7. На рисунке выделены поля обмоток, для которых были получены экспериментальные данные.

Таблицы полей концентрических обмоток для $I_0=285$ А

Таблицы магнитных полей для этого значения тока основной обмотки магнита были получены путем интерполяции таблиц полей для $I_0=600$ А с использованием экспериментальных зависимостей для $R=0$. При этом были введены дополнительные поправки в таблицы полей, полученных из измерений полей обмоток 2, 11, 19 для тока основной обмотки $I_0=285$ А. Поля всех обмоток приведены на рис.8.

Таблицы полей концентрических обмоток для $I_0=170$ А

Использование интерполяции полей обмоток при токе $I_0=600$ А для тока $I_0=170$ приводит к ошибке расчета полей обмоток, достигающей величины 2 - 3 мТл. Для уменьшения ошибки вычисления поля обмоток были получены путем расчетов при помощи компьютерной модели [3] магнитной системы циклотрона на основе системы программ POISCR [4]. Измерения полей обмоток 2, 11, 19 были использованы для тестирования расчетной модели. На

рис.9 приведены сравнения расчетных и измеренных полей для этих обмоток. На рис.10 - поля всех обмоток.

Таблицы полей concentрических обмоток для $I_0=120$ А

Для тока основной обмотки $I_0=120$ А поля concentрических обмоток были получены также при помощи расчетной модели на основе системы программ POISCR. Для тестирования расчетной модели использовались экспериментальные данные для обмоток 2, 11, 19. На рис.11 приведены поля всех обмоток.

Таблицы полей concentрических обмоток для промежуточных уровней тока основной обмотки магнита

Значения токов основной обмотки магнита $I_0=120, 170, 285, 570, 600$ А считаются основными (базовыми). Для получения таблиц полей concentрических обмоток для уровней тока основной обмотки магнита, отличных от базовых значений, используются следующие процедуры:

- для тока основной обмотки в диапазоне 285 - 430 А используется интерполяция таблиц для $I_0=285$ А при помощи зависимостей полей обмоток от тока основной обмотки для $R=0$;
- для тока основной обмотки в диапазоне 430 - 600 А используется интерполяция таблиц для $I_0=600$ А при помощи зависимостей полей обмоток от тока основной обмотки для $R=0$;
- для тока основной обмотки в диапазоне 120 - 285 А используется интерполяция таблиц полей для токов $I_0=120, 170, 285$ с коррекцией полученной таблицы при помощи зависимостей полей обмоток от тока основной обмотки для $R=0$.

На рис.12 и 13 приведены поля concentрических обмоток для токов основной обмотки магнита $I_0=155, 385$ А, полученных при помощи вышеизложенной методики.

Заключение

- В работе изложена методика, на основе которой получены таблицы полей concentрических обмоток, формирующих

магнитное поле циклотрона АИЦ-144 для всех рабочих уровней поля его основной обмотки.

- Таблицы полей обмоток составлены на основе минимального объема измерений магнитного поля и максимального использования расчетов, что значительно (примерно в семь раз) сократило время остановки циклотрона для проведения магнитных измерений.
- Полученные данные по полям концентрических обмоток позволяют в полном объеме провести итерационную процедуру по формированию требуемых изохронных полей циклотрона.

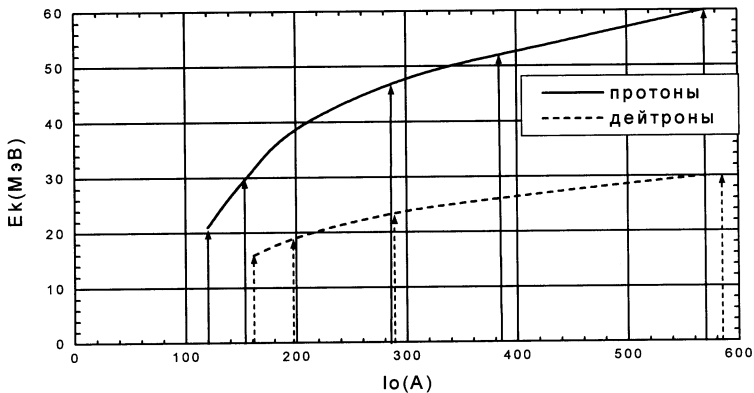


Рис.1. Энергия ускоренных частиц на конечном радиусе ($R_k \sim 60$ см) в зависимости от тока основной обмотки магнита циклотрона. Режимы формирования поля отмечены стрелками

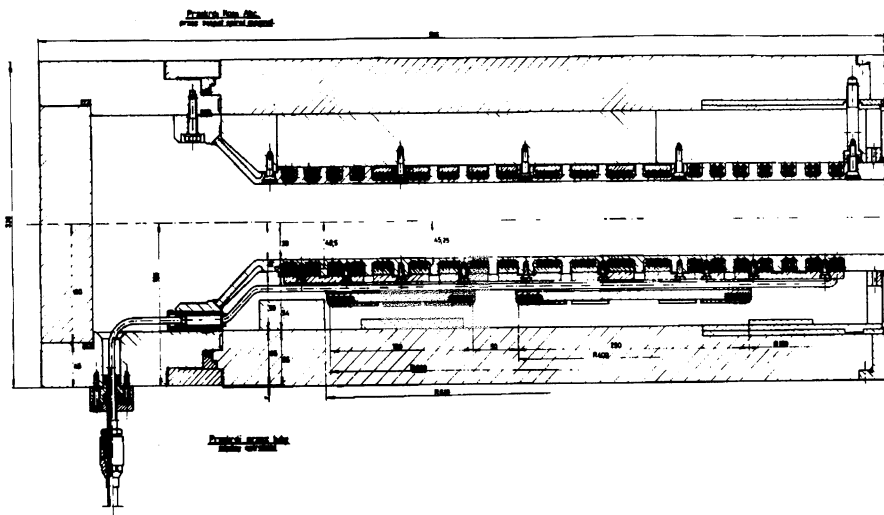


Рис.2. Магнитная структура и система токовых обмоток циклотрона АИЦ-144

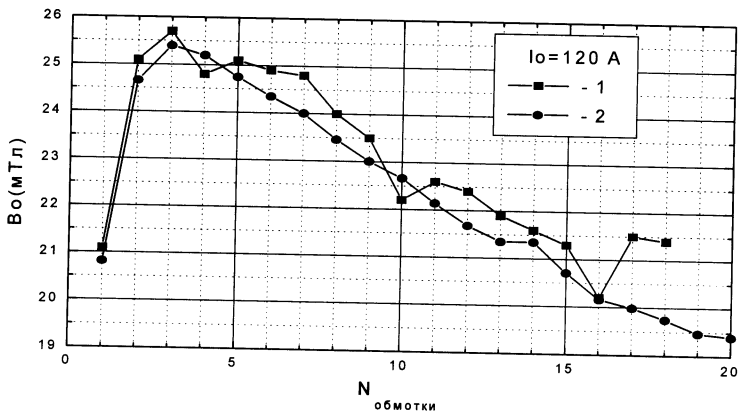


Рис.3. Магнитное поле концентрических обмоток на $R=0$,
 1 - случайная последовательность измерения;
 2 - последовательные измерения

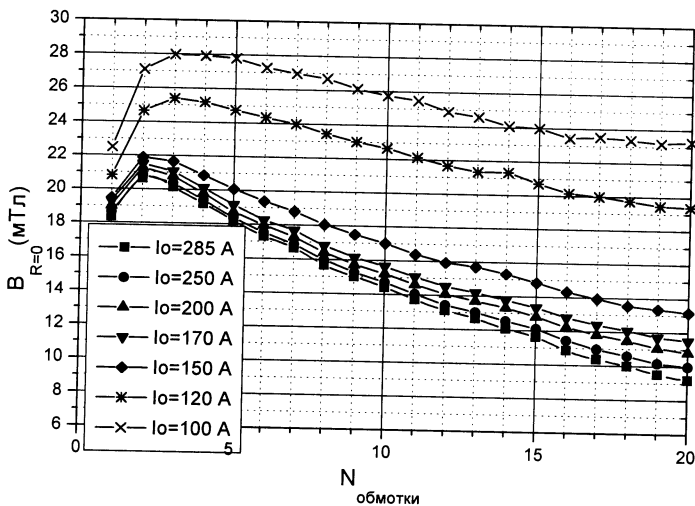


Рис.4. Магнитное поле концентрических обмоток на $R=0$,
 $I_0=100 - 285$ A

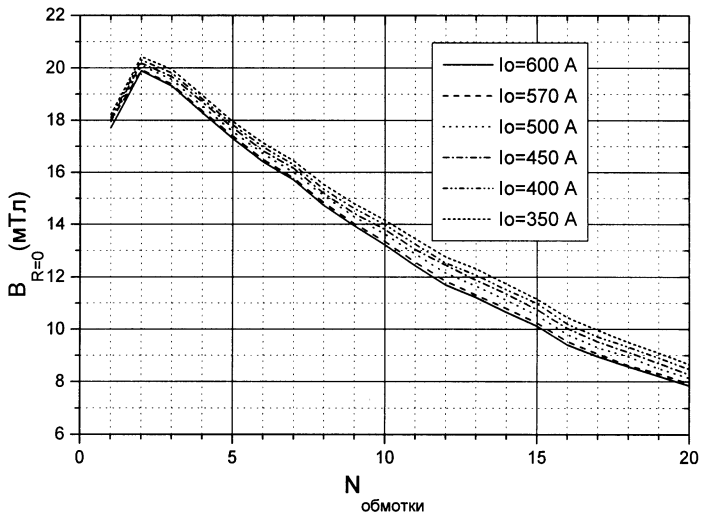


Рис.5. Магнитное поле концентрических обмоток на $R=0$, $I_0=350 - 600$ А

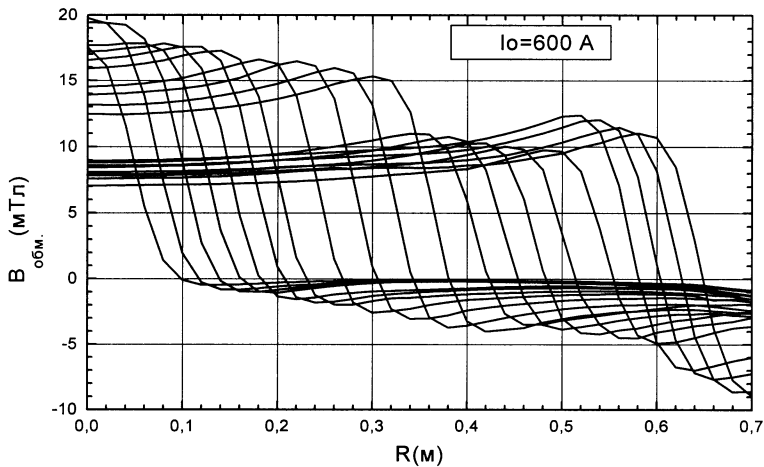


Рис.6. Магнитные поля всех концентрических обмоток для $I_0=600$ А

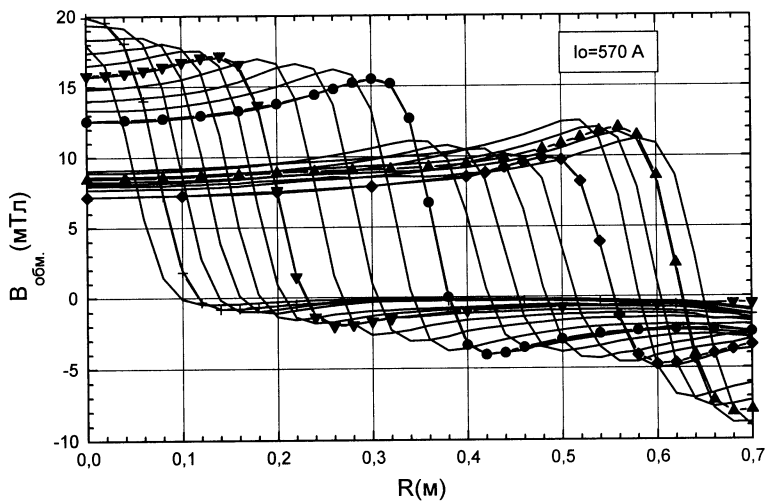


Рис.7. Магнитные поля всех концентрических обмоток для $I_0=570 \text{ A}$

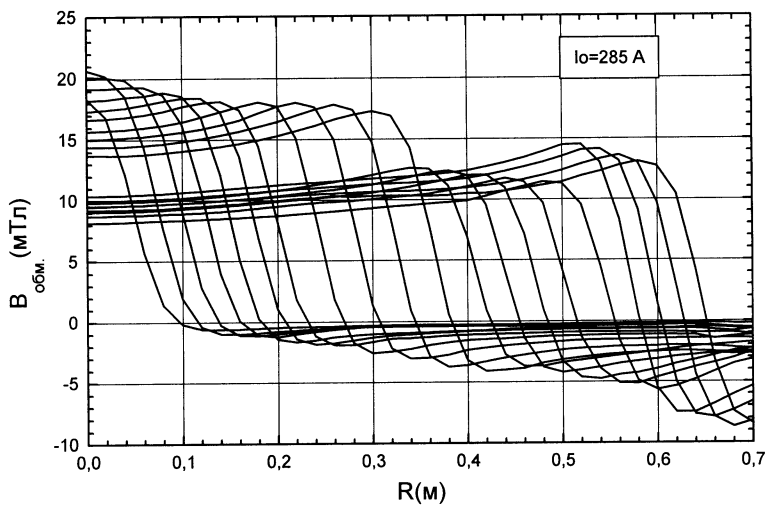


Рис.8. Магнитные поля всех концентрических обмоток для $I_0=285 \text{ A}$

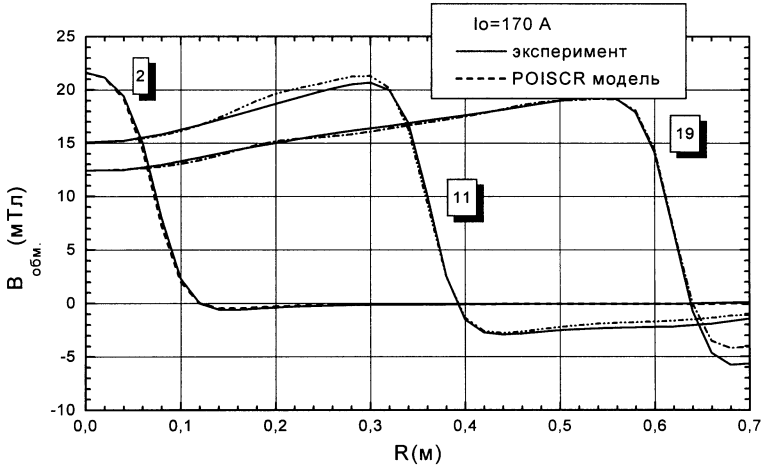


Рис.9. Измеренное и расчетное магнитное поле обмоток 2, 11, 19, $I_0=170$ А

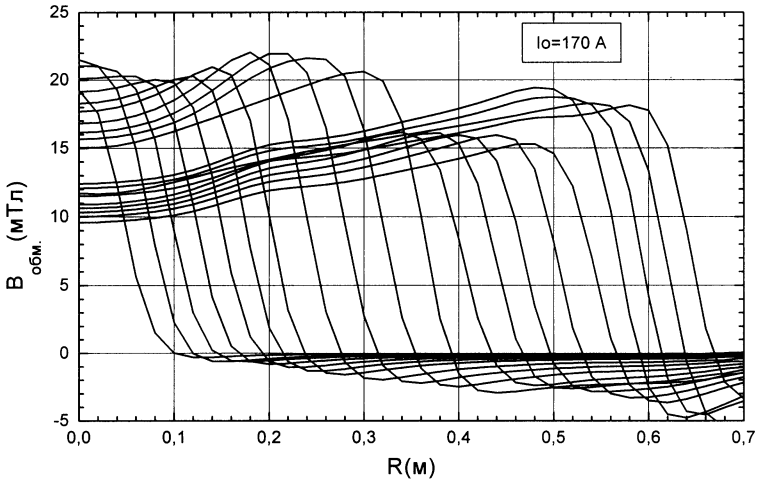


Рис.10. Магнитные поля всех концентрических обмоток для $I_0=170$ А

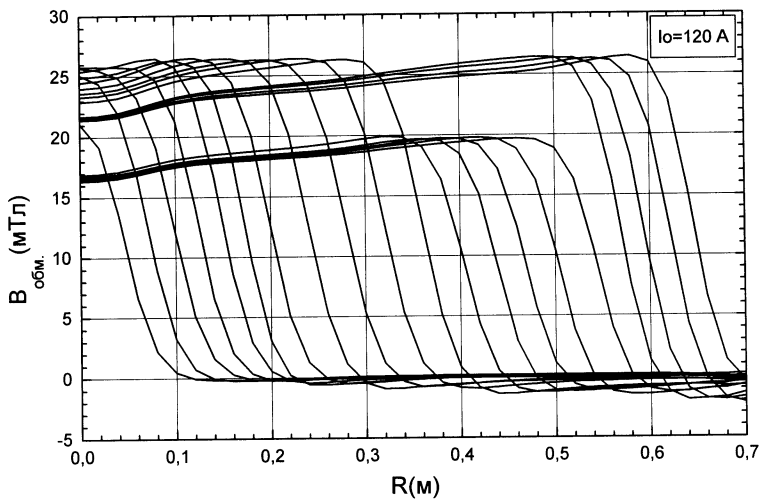


Рис.11. Магнитные поля всех concentрических обмоток для $I_0 = 120$ A

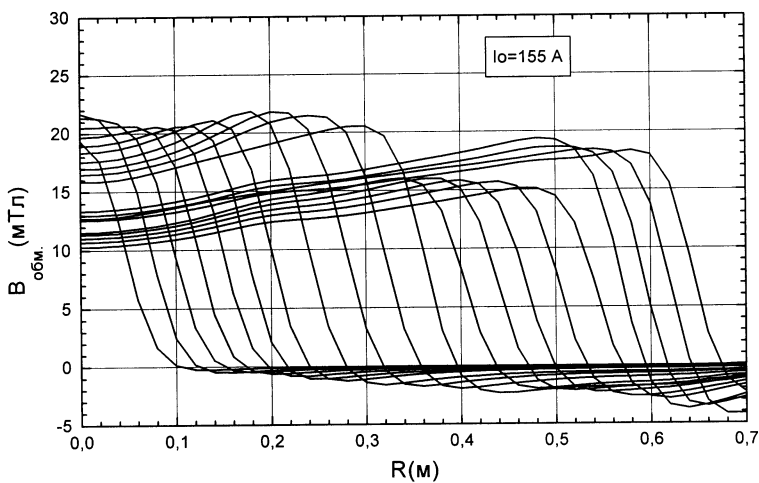


Рис.12. Магнитные поля всех concentрических обмоток для $I_0 = 155$ A

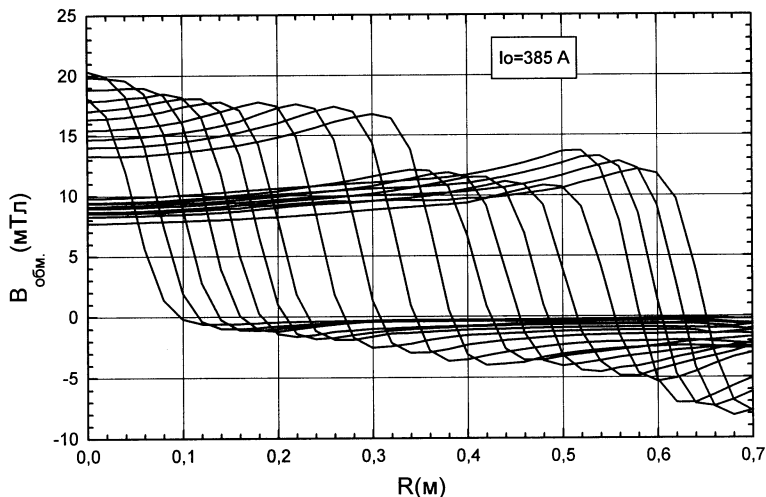


Рис.13. Магнитные поля всех концентрических обмоток для $I_0 = 385 \text{ A}$

Литература

- [1] O.N.Borisov et al. "Feasibility Study of the Beam Extraction from the AIC-144 Cyclotron". JINR, E9-96-492, Dubna, 1996. European Cyclotron Progress Meeting, ECPM XXXI, Groningen, 18-20 September 1997, Abstracts, p.24.
- [2] O.N.Borisov et al. "New Beam Extraction System for the AIC-144 Cyclotron". JINR, E9-98-130, Dubna, 1998. Proc. of the 15th Int. Conf. On Cycl. And their Appl., Caen, France, 14 - 19 June, 1998, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, p.528.
- [3] С.Б.Ворожцов и др. "Компьютерное моделирование магнитного поля изохронного циклотрона АИС-144". ОИЯИ, Р9-2000-10, Дубна, 2000.
- [4] R.F.Holsinger, Ch.Iselin. "The CERN POISSON program package user guide". CERN, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 февраля 2000 года.

Ворожцов С.Б и др.

P9-2000-22

Магнитные поля корректирующих обмоток изохронного циклотрона АИЦ-144

Разработана расчетная методика получения магнитных полей корректирующих токовых обмоток для изохронного циклотрона АИЦ-144 (Краков, Польша). Таблицы полей обмоток получены на основе минимального объема измерений магнитного поля и максимального использования расчетов, что значительно (примерно в семь раз) сократило время остановки циклотрона для проведения магнитных измерений. Полученные таблицы полей позволяют в полном объеме провести итерационную процедуру по формированию требуемых изохронных полей циклотрона.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Vorotsov S.B. et al.

P9-2000-22

Magnetic Fields of the Trim Coils for the AIC-144 Isochronous Cyclotron

The calculation method is developed for producing the magnetic fields of the trim coils for the AIC-144 isochronous cyclotron (Cracow, Poland). The coils field maps are received on the basis of the minimal volume of measurements of a magnetic field and maximal use of calculations, that is significant (approximately seven times) has reduced time of a stop of a cyclotron for realization of magnetic measurements. The received tables of fields in full allow to carry out iterative procedure on shaping required isochronous fields of a cyclotron.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 2.03.2000
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,72
Тираж 285. Заказ 51890. Цена 87 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области