

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-2000-39

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

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА АИЦ-144  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ  
ОБМОТОК

---

\*Институт ядерной физики, Краков, Польша

2000

Для изохронного циклотрона АИЦ-144 (Краков, Польша) разрабатывается и вводится в эксплуатацию новая система вывода [1, 2] пучков ускоренных частиц. Циклотрон АИЦ-144 кроме двадцати пар корректирующих концентрических обмоток снабжен двумя наборами из четырех пар гармонических катушек. Первый набор расположен в районе радиуса циклотрона  $R \sim 50$  см и предназначен для коррекции величины основной (четвертой) гармоники вариации магнитного поля. В случае необходимости, эти обмотки могут быть использованы и для коррекции первой гармоники поля. Второй набор гармонических обмоток расположен в районе радиуса циклотрона  $R \sim 60$  см и предназначен для формирования требуемой величины амплитуды и фазы первой гармоники магнитного поля, которая используется для заброса пучка на вход первого электростатического дефлектора канала вывода.

### Коррекция вариации магнитного поля

Для получения требуемых рабочих характеристик новой системы вывода циклотрона были сформированы требуемые рабочие магнитные поля в зоне ускорения циклотрона для девяти рабочих режимов [3]. Для трех из них для понижения частоты аксиальных колебаний  $Q_z$  в области радиусов  $R \sim 50$  см было использовано включение гармонических вариационных обмоток циклотрона при максимально возможном токе в них 400 А. Параметры этих режимов приведены в табл.1.

Таблица 1. Режимы формирования требуемого магнитного поля при использовании вариационных обмоток.

- $I_0$  - ток основной обмотки магнита циклотрона;
- $B$  - среднее магнитное поле;
- $f$  - частота обращения частиц;
- $E_k$  - энергия ускоренных частиц на конечном радиусе;
- $p$  - протоны;
- $d$  - дейтроны

№	Тип частицы	$I_0$ , А	$B$ , Тл	$f$ , МГц	$E_k$ , МэВ
1	$p$	117,7	1,08	16,208	22
2	$d, He^{+2}$	200	1,43	10,97	18,3
3	$d, He^{+2}$	169,9	1,3	10,222	16

Поля обмоток были выделены путем измерений магнитного поля циклотрона. Результаты измерения полей вариационных обмоток для тока 400 А в них представлены на рис.1 и 2. Измерения проводились для четырех значений тока основной обмотки магнита циклотрона. Требуемые рабочие магнитные поля циклотрона формировались при помощи концентрических обмоток с учетом воздействия на среднее поле (рис.2) вариационных обмоток. Точность формирования требуемого магнитного поля (сформированное поле минус требуемое) для различных итераций (расчетная и экспериментальные) представлена на рис.3 - 5 для трех рабочих режимов. Значения токов в концентрических обмотках для этих режимов приведены в табл.2.

Таблица 2. Токи в корректирующих обмотках циклотрона

№	1	2	3
Тип част.	p	d He <sup>+2</sup>	d He <sup>+2</sup>
I <sub>0</sub> , А	117,7	200	169,9
N <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>
1	-189	-132	-193
2	-165	0	207
3	-166	-59	-201
4	-104	0	159
5	-96	0	0
6	0	70	127
7	-70	72	71
8	0	12	123
9	-70	114	91
10	0	0	64
11	-55	96	104
12	20	20	146
13	69	248	209
14	76	96	207
15	85	179	176
16	140	123	193
17	72	208	161
18	276	368	272
19	268	0	191
20	0	0	0

Частоты аксиальных свободных бетатронных колебаний ускоряемых частиц для сформированных магнитных полей приведены на рис.6-8. Расчеты частот проводились по аналитическим выражениям и путем интегрирования характеристик равновесных орбит ускоряемых частиц при помощи программы CYCLOPS. На рис.6 приведена также зависимость частоты от радиуса в случае, когда вариационные обмотки не используются. Видно, что вариационные обмотки дают уменьшение частоты на величину порядка 0,01.

### Коррекция первой гармоники магнитного поля в зоне вывода пучка

Для шести рабочих режимов ускорения заряженных частиц в циклотроне АИЦ-144 было проведено формирование требуемой величины амплитуды и фазы первой гармоники магнитного поля, необходимой для получения раскачки ускоряемого пучка и его заброса на вход первого элемента системы вывода пучка. Параметры режимов и требуемые величины амплитуды и фазы первой гармоники поля приведены в табл.3.

Таблица 3. Режимы для формирования первой гармоники магнитного поля в зоне вывода пучка.

$B$  - среднее магнитное поле;

$f$  - частота обращения частиц;

$E_k$  - энергия ускоренных частиц на конечном радиусе;

$p$  - протоны;

$d$  - дейтроны;

$B_1$  - требуемая амплитуда первой гармоники в зоне  $R \sim 60$  см;

$\phi_1$  - требуемая фаза первой гармоники в зоне  $R \sim 60$  см

№	Тип частиц	$I_0, A$	$B, Tл$	$f, MГц$	$E_k, MэВ$	$B_1, мТл$	$\phi_1, град$
1	$p$	566	1,8	26,615	60	0,2	170
2	$p$	279	1,6	23,3	46	0,2	170
3	$p$	169,2	1,28	20	31,1	0,2	170
4	$p$	117,7	1,08	16,208	22	0,1	170
5	$d, He^{+2}$	578	1,8	13,612	30	0,2	190
6	$d, He^{+2}$	286	1,6	12,106	22	0,2	190

Формирование требуемых характеристик первой гармоники поля проводилось при помощи новых гармонических обмоток. Их положение и обозначение (относительно оси дуанта циклотрона) показано на рис.9. Измерение полей этих обмоток проводилось для четырех значений токов основной обмотки магнита ( $I_0=120, 170, 285, 568$  А). Гармонические обмотки включались попарно с противоположными по знаку токами в них:

- 1-я пара - HC2-1 - (+250 А), HC2-3 - (-250 А);
- 2-я пара - HC2-2 - (+250 А), HC2-4 - (-250 А).

Результаты измерений (амплитуда и фаза первой гармоники поля обмоток) представлены на рис.10-13. Измеренная фаза первой гармоники пары обмоток HC2-2/HC2-4 уменьшена на 90 градусов с целью демонстрации точности изменения фазы гармоники для разных пар обмоток на величину 90 градусов. Видно, что разброс изменения фазы может достигать 10 градусов. Несовпадение величины амплитуды гармоники для различных пар обмоток находится в пределах 0,1 - 0,2 мТл.

Амплитуда первой гармоники магнитного поля циклотрона в зоне вывода пучка в несколько раз превышает значение, требуемое для раскочки и заброса пучка. Измеренная величина гармоники определяется не только конфигурацией ферромагнитных элементов системы, но и системой токовых концентрических обмоток. Величина первой гармоники поля меняется даже при не очень значительных изменениях токов в концентрических обмотках, которые осуществлялись при итерационной процедуре формирования требуемых полей циклотрона. Это утверждение проиллюстрировано на рис.14 - 15 для формируемого рабочего поля циклотрона (режим р,  $I_0=568$  А). Нулевая итерация измерения поля (0 итер.) соответствует измерению поля только основной обмотки магнита. Для расчета токов в гармонических обмотках для получения требуемого распределения первой гармоники поля использовались магнитные поля, измеренные для финальных итераций формирования требуемых рабочих полей циклотрона.

При выборе токов в гармонических обмотках расчет проводился таким образом, что требуемые значения амплитуды и фазы гармоники обеспечивались на радиусе  $R=60$  см. Выбранные значения токов в гармонических обмотках для различных режимов ускорения приведены в табл.4. Результаты расчета и измерений

первой гармоники поля в зоне конечных радиусов приведены на рис.16-19.

Таблица 4. Токи в гармонических обмотках циклотрона

№ реж.	1	2	3	4	5	6
Тип част.	p	p	p	p	d He <sup>+2</sup>	d He <sup>+2</sup>
I <sub>0</sub> , А	566	279	169,2	117,7	578	286
N <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>	I <sub>обм.</sub>
НС2-1	-166	-154	-104	-49	-173	-162
НС2-2	-76	-71	15	43	-115	-93
НС2-3	166	154	104	49	173	162
НС2-4	76	71	-15	-43	115	93

## Заключение

Для циклотрона АИЦ-144 сформированы с необходимой степенью точности дополнительные рабочие магнитные поля с использованием вариационных обмоток. Эти поля могут быть применены для ускорения пучков в циклотроне до конечного радиуса с минимальными фазовыми потерями при пониженных значениях частоты аксиальных бетатронных колебаниях в зоне рабочего радиуса R~50 см.

При помощи гармонических обмоток сформированы требуемые зависимости от радиуса амплитуды и фазы первой гармоники магнитного поля в зоне радиальной раскачки и заброса пучка на вход системы вывода пучка. Сформированные зависимости первой гармоники поля могут быть использованы для изучения процесса раскачки и заброса пучка в ускорителе при отсутствии в системе вывода магнитных каналов.

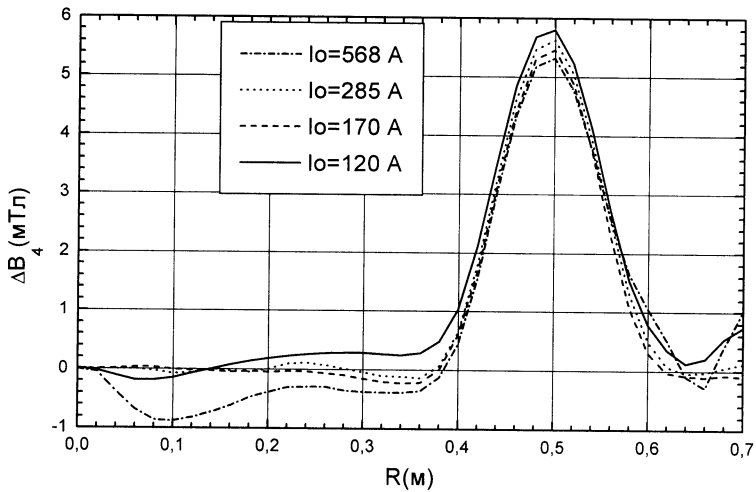


Рис.1. Изменение величины вариации магнитного поля от вариационных обмоток

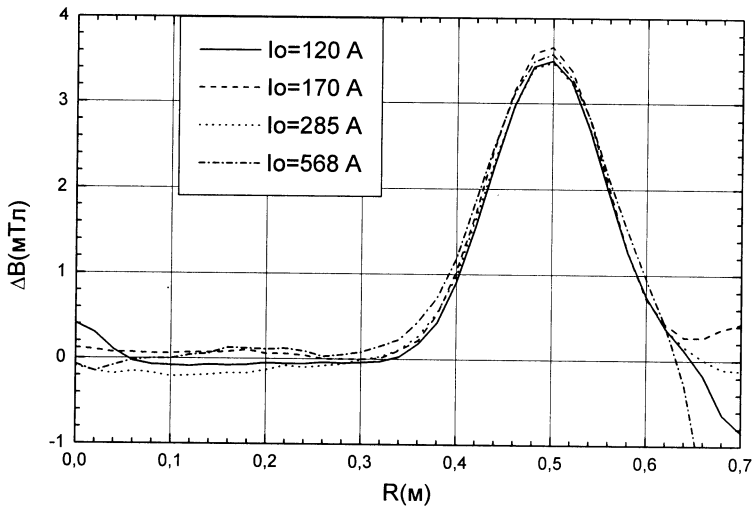


Рис.2. Изменение величины среднего магнитного поля от вариационных обмоток

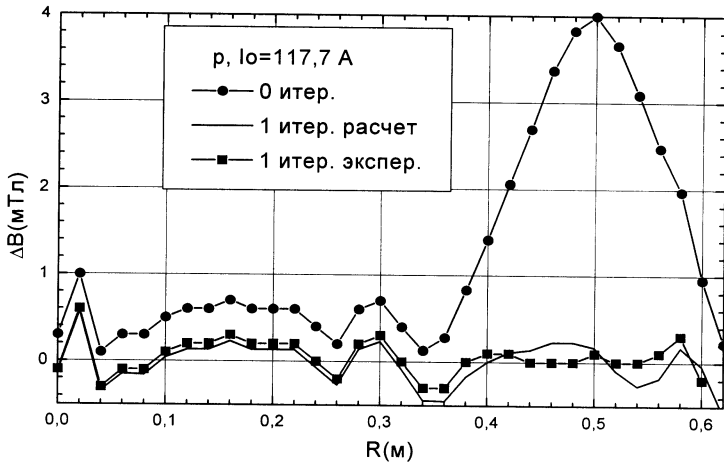


Рис.3. Точность формирования требуемого магнитного поля ( $\rho$ ,  $I_0=117,7$  A)

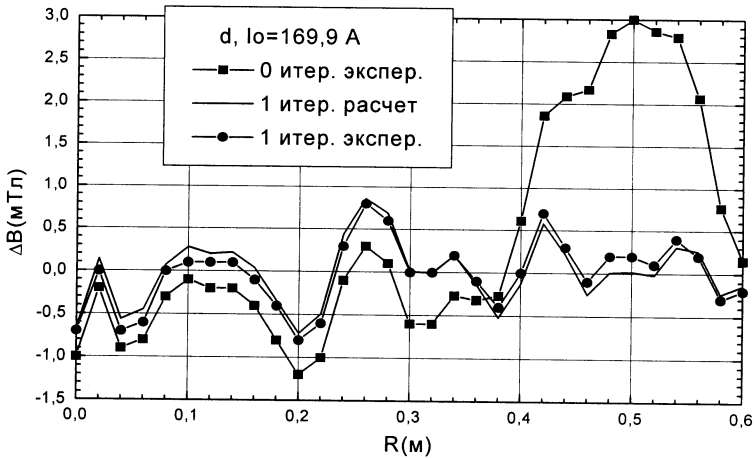


Рис.4. Точность формирования требуемого магнитного поля ( $d$ ,  $I_0=169,9$  A)



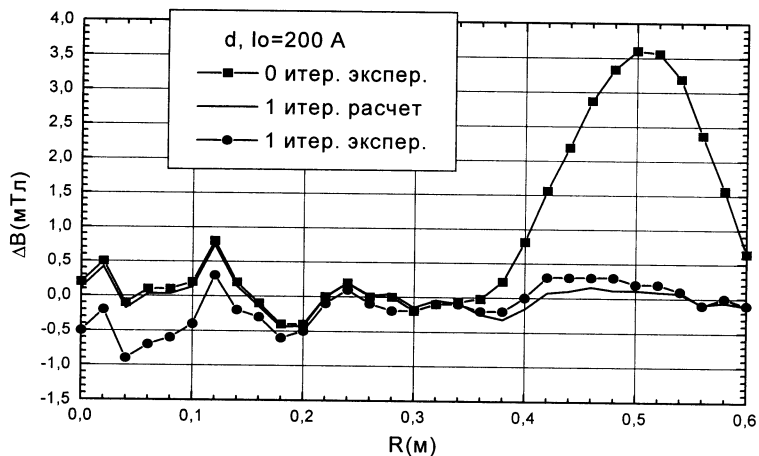


Рис.5. Точность формирования требуемого магнитного поля ( $d, I_0=200$  A)

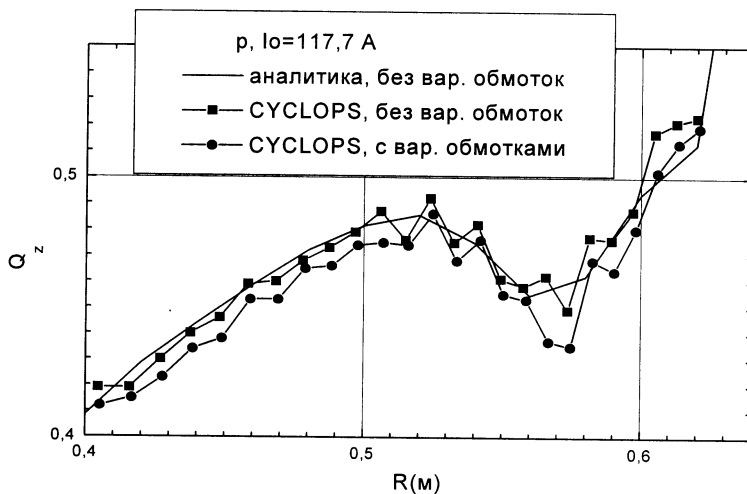


Рис.6. Частота аксиальных свободных бетатронных колебаний ( $p, I_0=117.7$  A)

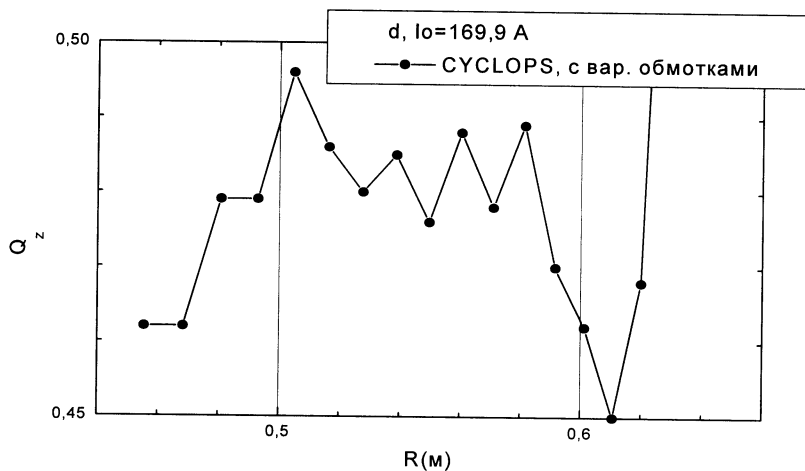


Рис.7. Частота аксиальных свободных бетатронных колебаний ( $d, I_0=169,9$  A)

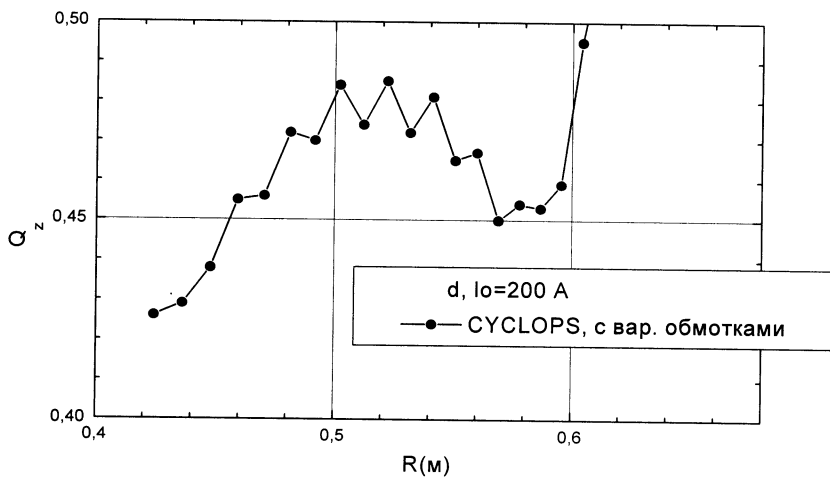


Рис.8. Частота аксиальных свободных бетатронных колебаний ( $d, I_0=200$  A)

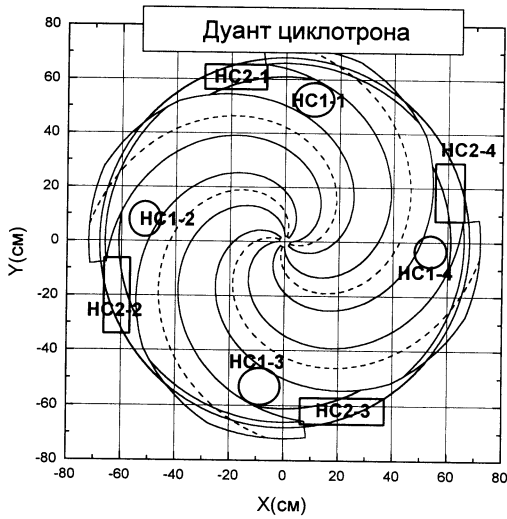


Рис.9. Расположение и обозначение гармонических обмоток циклотрона. НС1 - вариационные обмотки; НС2 - гармонические обмотки первой гармоники

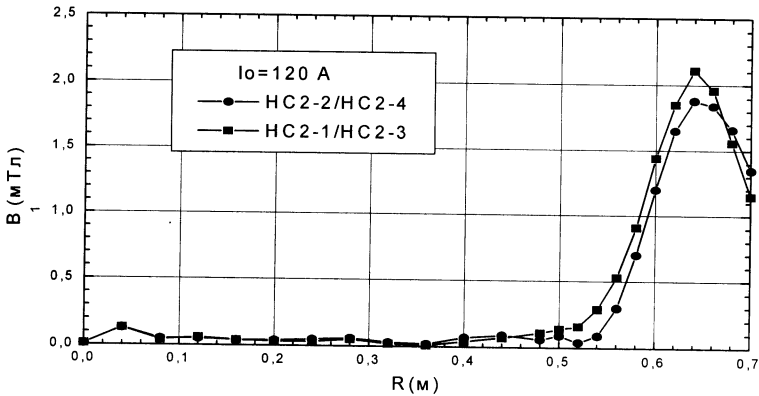


Рис.10. Амплитуда первой гармоники поля для двух пар гармонических обмоток ( $I_0=120$  A)

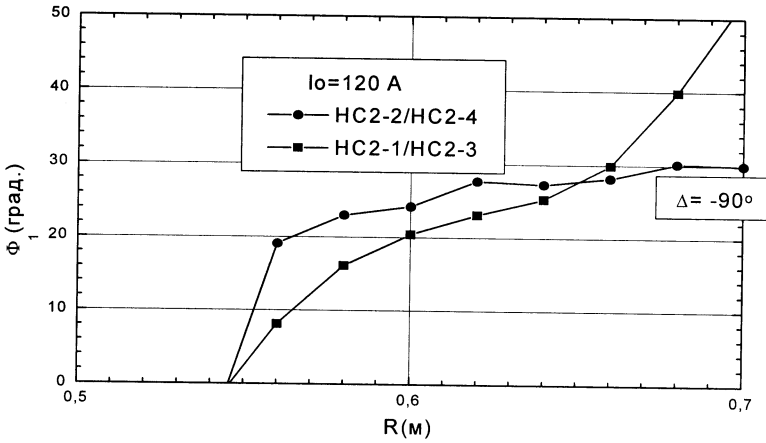


Рис.11. Фаза первой гармоники поля для двух пар гармонических обмоток ( $I_0=120$  A)

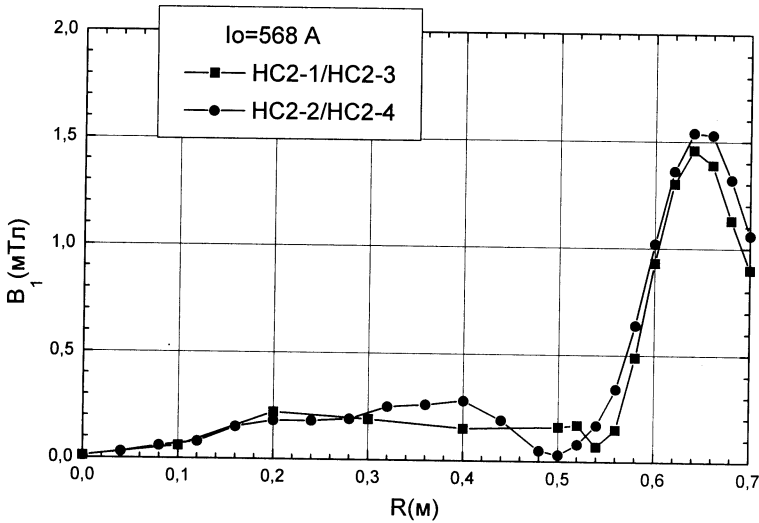


Рис.12. Амплитуда первой гармоники поля для двух пар гармонических обмоток ( $I_0=568$  A)

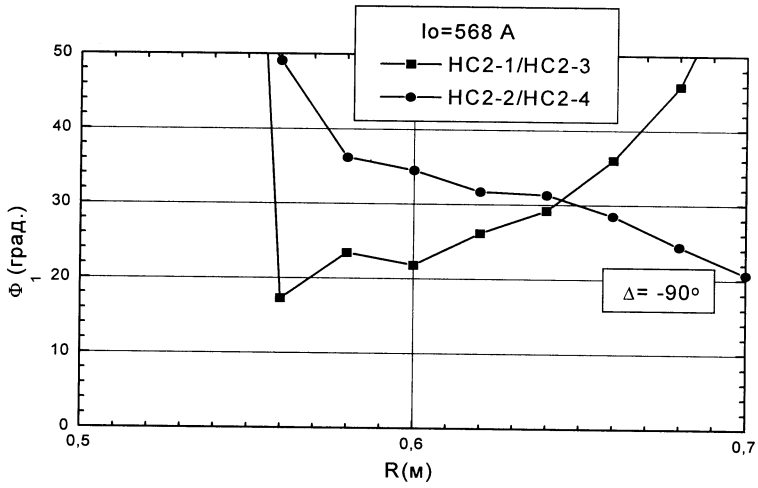


Рис.13. Фаза первой гармоники поля для двух пар гармонических обмоток ( $I_0=568$  A)

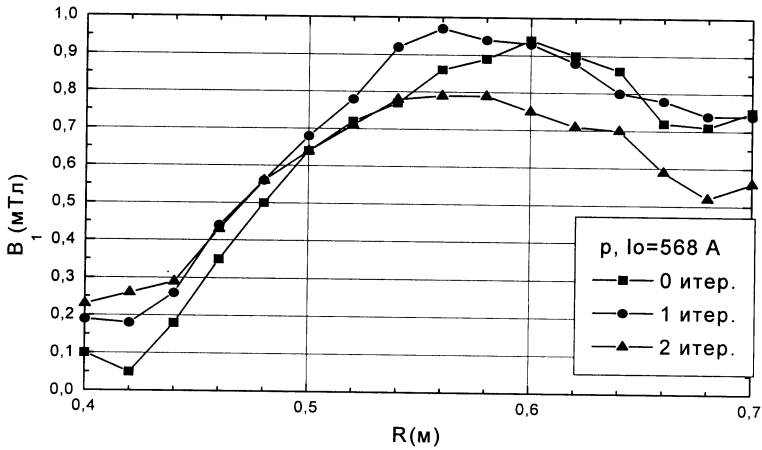


Рис.14. Амплитуда первой гармоники поля для различных итераций его формирования (протоны,  $I_0=568$  A)

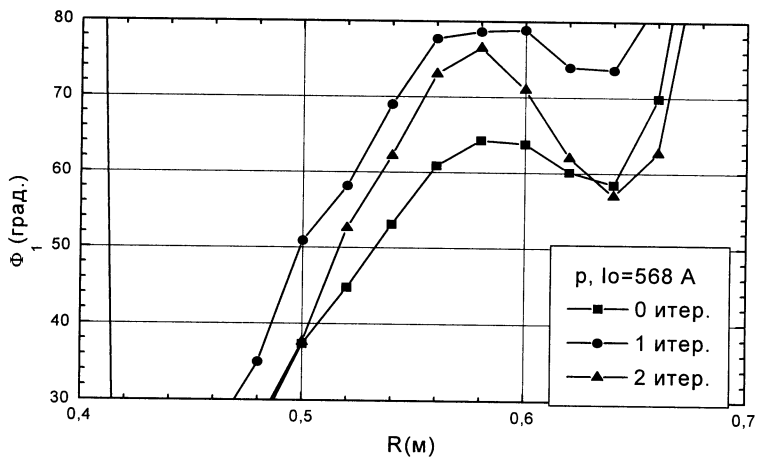


Рис.15. Фаза первой гармоники поля для различных итераций его формирования (протоны,  $I_0=568$  A)

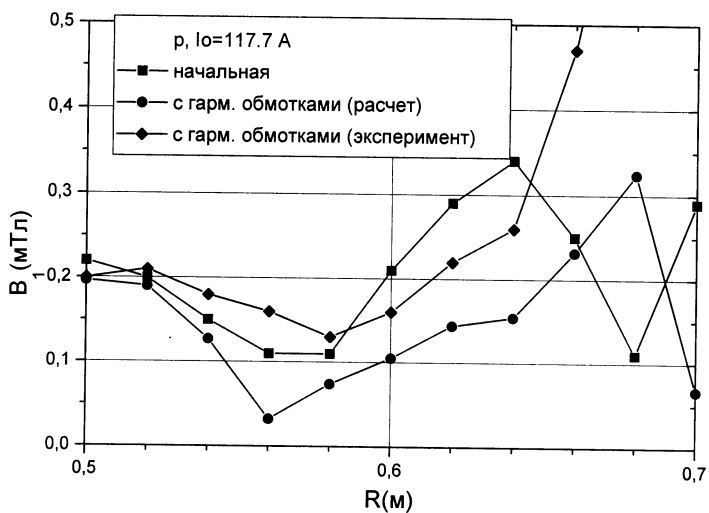


Рис.16. Амплитуда первой гармоники поля: исходная и скорректированная гармоническими обмотками ( $\rho$ ,  $I_0=117,7$ A)

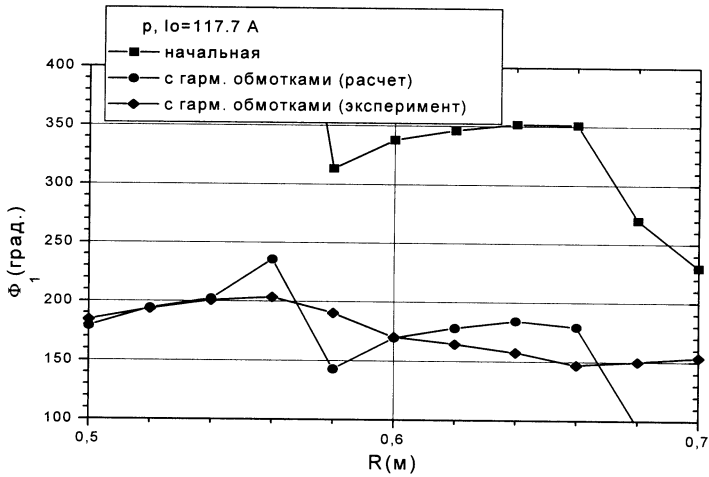


Рис.17. Фаза первой гармоники: исходная и скорректированная гармоническими обмотками ( $p, I_0=117,7$  A)

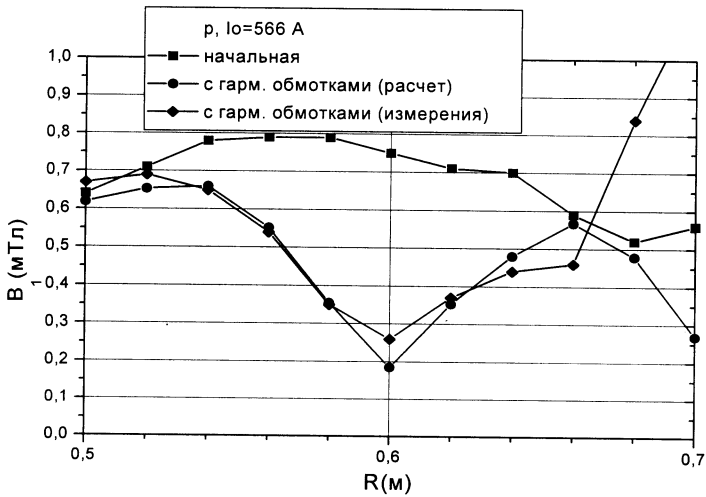


Рис.18. Амплитуда первой гармоники поля: исходная и скорректированная гармоническими обмотками ( $p, I_0=566$  A)

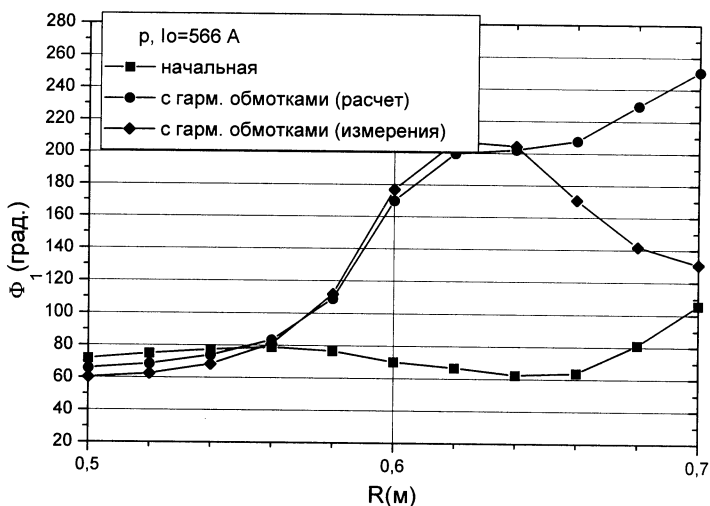


Рис.19. Фаза первой гармоники: исходная и скорректированная гармоническими обмотками ( $p, I_0=566 \text{ A}$ )

## 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. "Формирование рабочих магнитных полей изохронного циклотрона АИЦ-144". ОИЯИ, Р9-2000-38, Дубна, 2000.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 марта 2000 года.



Ворожцов С.Б. и др.

P9-2000-39

Формирование магнитного поля изохронного циклотрона АИЦ-144 с использованием гармонических обмоток

Для изохронного циклотрона АИЦ-144 (Краков, Польша) сформированы рабочие магнитные поля с использованием вариационных обмоток. Эти поля могут быть применены для ускорения пучков в циклотроне до конечного радиуса с минимальными фазовыми потерями при пониженных значениях частоты аксиальных бетатронных колебаний в зоне рабочего радиуса  $R \sim 50$  см. При помощи гармонических обмоток сформированы требуемые зависимости от радиуса амплитуды и фазы первой гармоники магнитного поля в зоне радиальной раскачки и заброса пучка на вход системы вывода пучка. Сформированные зависимости от радиуса первой гармоники поля могут быть использованы для изучения процесса раскачки и заброса пучка в ускорителе при отсутствии в системе вывода магнитных каналов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Vorojtsov S.B. et al.

P9-2000-39

Harmonic Coil Application for Shaping of the Magnetic Field of Isochronous Cyclotron AIC-144

Required magnetic field distributions for isochronous cyclotron AIC-144 (Krakow, Poland) are generated with the harmonic coil contribution being included. These field maps are suitable for acceleration of protons, deuterons and  $\alpha$ -particles up to the final radius of the cyclotron. This way, a decreasing of the axial oscillation frequency near radius  $\sim 50$  cm have been assured. The minimal particle phase losses are implied. Harmonic coils are applied to shape a required radial dependence of the amplitude and a phase of the 1-st magnetic field harmonic for investigation of the beam turn separation enhancement at the deflector mouth. No magnetic channels are installed in this case.

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 17.03.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,86

Тираж 285. Заказ 51921. Цена 1 р. 04 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области