

P9-2007-80

Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбемян, С. Л. Богомолов, О. Н. Борисов,  
В. А. Бузмаков, И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов,  
В. И. Казача, И. В. Калагин, В. П. Кухтин\*, Е. В. Ламзин\*,  
С. В. Пашенко, В. А. Соколов, С. Е. Сычевский\*,  
А. В. Тихомиров

РЕЗУЛЬТАТЫ УСКОРЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ АЗОТА,  
АРГОНА, КРИПТОНА В ХОДЕ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ  
РАБОТ НА ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ **ДЦ-60**

---

\* НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, С.-Петербург

Гикал Б. Н. и др.

P9-2007-80

Результаты ускорения пучков ионов азота, аргона, криптона в ходе пусконаладочных работ на изохронном циклотроне ДЦ-60

В конце 2006 г. в Междисциплинарном научно-исследовательском комплексе (МНИК, г. Астана, Казахстан) был запущен циклотрон тяжелых ионов ДЦ-60, созданный в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Циклотронный комплекс разработан для решения широкого круга научно-прикладных задач с использованием пучков ионов с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. В процессе пусконаладочных работ проведены эксперименты по ускорению пучков ионов азота, аргона, криптона ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ ) на различных уровнях магнитного поля 1,25–1,65 Тл. Проведено исследование и оптимизация процесса ускорения ионов на четвертой и шестой гармониках ускоряющего ВЧ-напряжения, получены проектные параметры ускоренных пучков.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Gikal B. N. et al.

P9-2007-80

Experimental Results on Acceleration of Nitrogen, Argon, Krypton Ion Beams in the Frame of Starting-up Works on Isochronous Cyclotron DC-60

The heavy ion cyclotron DC-60, created in the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, was started at the end of 2006 at the Interdisciplinary Research Complex (Astana, Kazakhstan). The cyclotron complex is developed for solving a wide range of scientifically-applied problems with the use of ion beams with energy range 0.35 to 1.77 MeV/nucleon. In the frame of starting-up and adjustment works, the experiments on acceleration of nitrogen, argon, krypton ion beams ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ ) at various levels of the magnetic field 1.25–1.65 T were made. Research and optimization of acceleration process of ions on the fourth and sixth harmonics accelerating RF voltage is carried out. Design parameters of the accelerated ion beams are realized.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

В 2006 г. в Астане (Казахстан) открыт новый научный центр — Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс (МНИК), базовой установкой которого является циклотрон тяжелых ионов ДЦ-60 [1, 2]. Ускорительный комплекс разработан и создан в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ для проведения научно-прикладных исследований и производства ядерных мембран на пучках тяжелых ионов низкой энергии. Работы по сборке ускорительного комплекса завершены 21 сентября 2006 г. В декабре 2006 г. успешно ускорен и выведен из циклотрона первый пучок заряженных частиц.

В ходе пусконаладочных работ проведены эксперименты по ускорению пучков ионов азота, неона, аргона, криптона ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $^{20}\text{Ne}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,



Рис. 1. Циклотронный комплекс ДЦ-60 в Астане

$^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ ) на различных уровнях магнитного поля 1,25–1,65 Тл. Проведено исследование и оптимизация процесса ускорения ионов на четвертой и шестой гармониках ускоряющего ВЧ-напряжения, получены проектные параметры ускорения и вывода пучков.

Циклотрон ДЦ-60 в процессе пусконаладочных работ тестировался в нескольких рабочих точках. Основные параметры тестовых режимов представлены в табл. 1.

На рис. 2 представлена рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60, на которой пронумерованными кружочками отмечены рассматриваемые тестовые рабочие режимы.

В выбранных тестовых рабочих режимах проведены исследования, в ходе которых были измерены зависимости тока ускоряемого пучка от уровня маг-

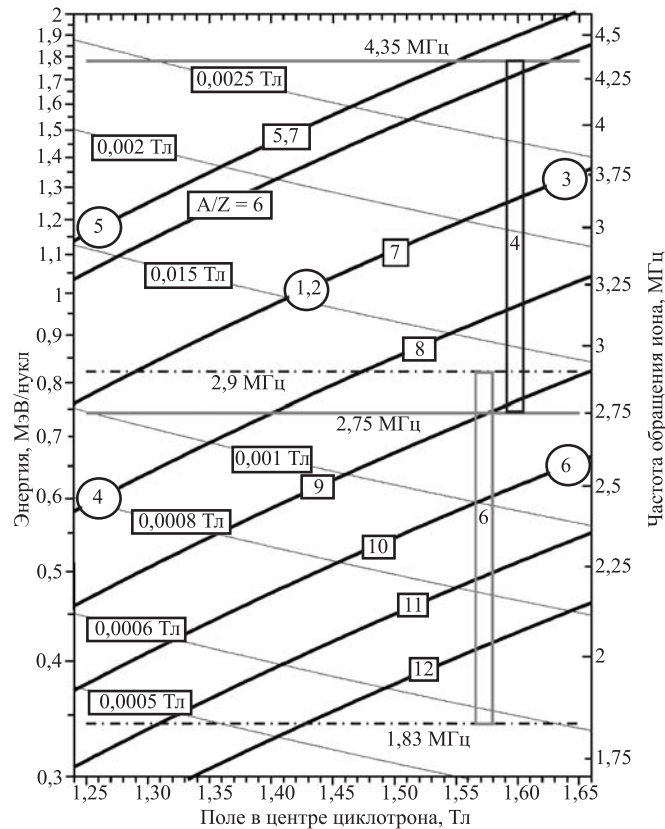


Рис. 2. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60 с отмеченными тестовыми режимами

**Таблица 1. Параметры тестовых режимов работы циклотрона ДЦ-60**

Тест №	1	2	3	4	5	6
Ион	$^{84}\text{Kr}^{+12}$	$^{14}\text{N}^{2+}$	$^{14}\text{N}^{2+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{40}\text{Ar}^{7+}$	$^{40}\text{Ar}^{4+}$
$A/Z$	7	7	7	8	5,7	10
$B_0$ , Тл	1,42	1,42	1,64	1,25	1,25	1,64
ВЧ, МГц	12,61	12,61	14,42	14,42	13,6	15,2
Кратность ВЧ	4	4	4	6	4	6
Напряжение инжекции, кВ	12,1	12,1	15,5	11,5	11,3	11
Энергия, МэВ/нукл	1	1	1,32	0,58	1,14	0,65

нитного поля на нескольких радиусах (резонансные кривые), распределение тока пучка по радиусу, изучено влияние подстройки магнитного поля при помощи корректирующих катушек.

Предварительный подбор токов радиальных корректирующих катушек проведен при помощи программы, оптимизирующей распределение среднего магнитного поля по радиусу на основе базы данных измерений основного магнитного поля циклотрона и вкладов радиальных корректирующих катушек.

Сформированное магнитное поле [3–5] позволило осуществить ускорение пучков ионов во всем рабочем диапазоне с эффективностью до 96 % от внутреннего радиуса ( $R = 120$  мм) до конечного радиуса циклотрона ( $R = 680$  мм).

### 1. ТЕСТ №1. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ КРИПТОНА $^{84}\text{Kr}^{+12}$ ДО ЭНЕРГИИ 1 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов криптона  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  ( $A/Z = 7$ ) до энергии 1 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ВЧ-поля при среднем магнитном поле 1,42 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 215,8 А и частоте ускоряющего напряжения 12,61 МГц, табл. 1. После оптимизации режима работы канала аксиальной инжекции ток пучка ионов криптона за анализирующим магнитом составлял 20 мкА. Следует

**Таблица 2. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$**

Ток пучка на внутреннем радиусе $R = 110$ мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода $R = 680$ мм, мкА	Эффективность ускорения пучка в циклотроне, %
2,72	2,48	91,2

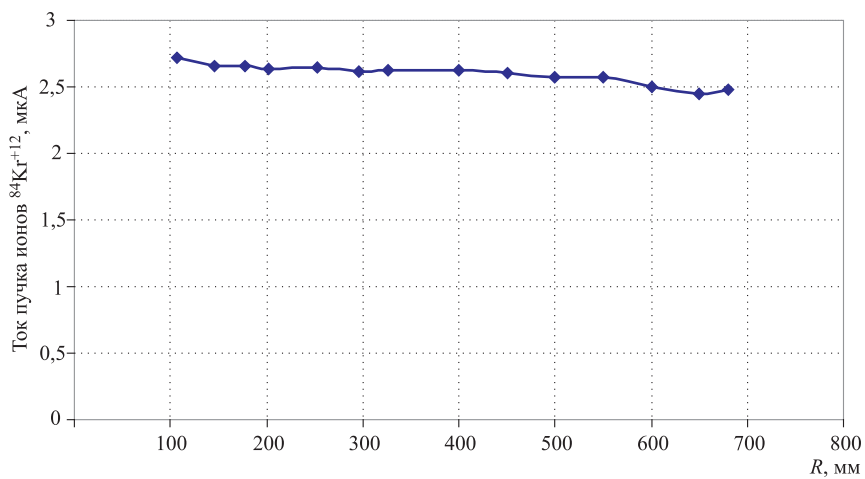


Рис. 3. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  при ускорении в магнитном поле 1,42 Тл. Оптимизация магнитного поля радиальными катушками не применялась

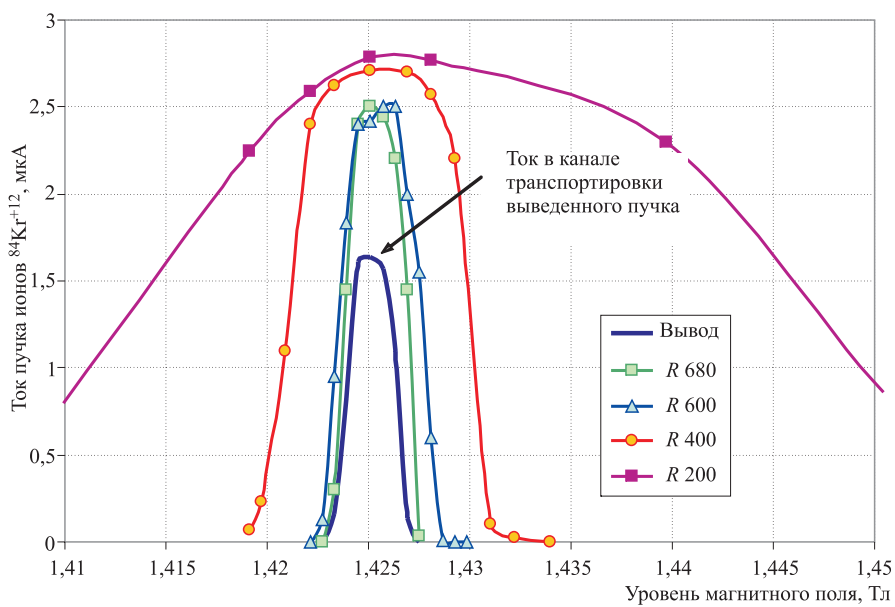


Рис. 4. Зависимость тока пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  от уровня магнитного поля циклотрона

учесть, что анализирующий магнит канала аксиальной инжекции не позволяет разделять изотопы криптона, а доля  $^{84}\text{Kr}$  в естественной смеси — 56,9 %. Таким образом, величина полезной составляющей в токе инжектируемого пучка 11,4 мкА.

Ток пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  на внутреннем радиусе циклотрона  $R = 110$  мм равен 2,48 мкА, что соответствует коэффициенту захвата в ускорение в центре циклотрона  $\approx 22$  %. Результат получен с использованием системы банчирования пучка.

В табл. 2 и на рис. 3, 4 представлены результаты исследования ускорения пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  внутри циклотрона от внутреннего радиуса  $R = 110$  мм до конечного радиуса циклотрона,  $R = 680$  мм. В данном режиме работы оптимизация магнитного поля радиальными катушками не использовалась. Получена эффективность ускорения в циклотроне 91,2 %, что свидетельствует о хорошем качестве формирования магнитного поля.

Осуществлен вывод ускоренных ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  из циклотрона ДЦ-60 при помощи электростатического дефлектора и пассивного магнитного канала. Ток выведенного пучка составил 1,65 мкА, что соответствует коэффициенту вывода пучка из циклотрона 66 %.

## 2. ТЕСТ №2. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ АЗОТА $^{14}\text{N}^{+2}$ ДО ЭНЕРГИИ 1 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$ , ( $A/Z = 7$ ) до энергии 1 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ускоряющего ВЧ-поля при среднем магнитном поле 1,42 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 215,8 А и частоте ускоряющего напряжения 12,61 МГц,

**Таблица 3. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$**

Режим	Ток пучка в канале инжекции после анализирующего магнита, мкА	Коэффициент захвата пучка в ускорение в центре, %	Ток пучка на внутреннем радиусе $R = 120$ мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода $R = 680$ мм, мкА	Эффективность ускорения пучка в циклотроне, %
Без банчера	74	5,3	3,9	3,75	96
С банчером	74	14,3	10,5	10	95

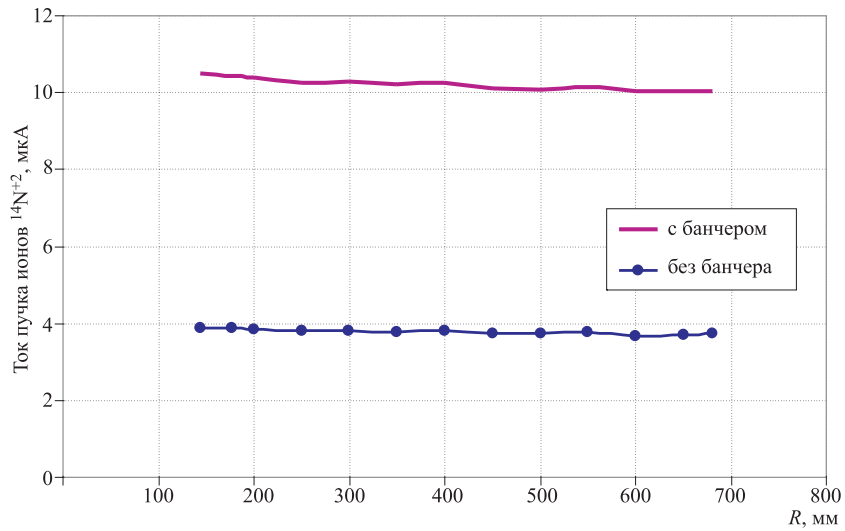


Рис. 5. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  при ускорении в магнитном поле 1,42 Тл без использования системы банчировки пучка и в случае использования системы банчировки пучка

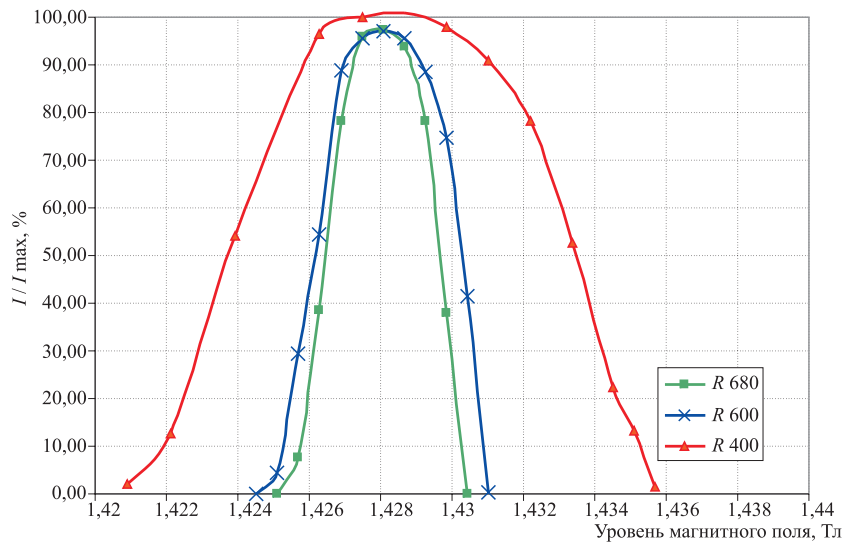


Рис. 6. Зависимость интенсивности пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  в относительных единицах от уровня магнитного поля циклотрона на радиусах 400, 600 и 680 мм



табл. 1. Исследованы режимы работы с использованием и без использования системы банчирования пучка. В табл. 3 и на рис. 5, 6 представлены результаты исследования ускорения пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$ .

Рассмотренный режим ускорения соответствует номинальной рабочей точке, в которой магнитное поле сформировано только за счет железных масс. В процессе настройки режима ускорения оперативная подстройка магнитного поля радиальными корректирующими катушками не привела к заметному увеличению интенсивности пучка, что говорит о хорошем качестве формирования магнитного поля.

### 3. ТЕСТ №3. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ АЗОТА $^{14}\text{N}^{+2}$ ДО ЭНЕРГИИ 1,32 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$  ( $A/Z = 7$ ) до энергии 1,32 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ВЧ-поля при среднем магнитном поле 1,62 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 309 А и частоте ускоряющего напряжения 14,42 МГц.

После оптимизации режима работы канала аксиальной инъекции ток пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$  за анализирующим магнитом составлял 31 мкА. Ток пучка на внутреннем радиусе циклотрона  $R = 120$  мм, полученный без использования системы банчирования пучка, был равен 1,62 мкА, что соответствует коэффициенту захвата пучка в ускорение в центре циклотрона  $\approx 5,2$  %.

В режиме работы с отключенными корректирующими катушками ток ускоренного пучка на радиусе вывода  $R = 680$  мм был равен 1,2 мкА. При этом коэффициент прохождения пучка в циклотроне составил 74,5 %. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позво-

Таблица 4. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе $R = 120$ мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода $R = 680$ мм, мкА	Эффективность ускорения пучка в циклотроне, %
Корректирующие катушки выключены	1,61	1,2	74,5
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	1,62	1,46	90

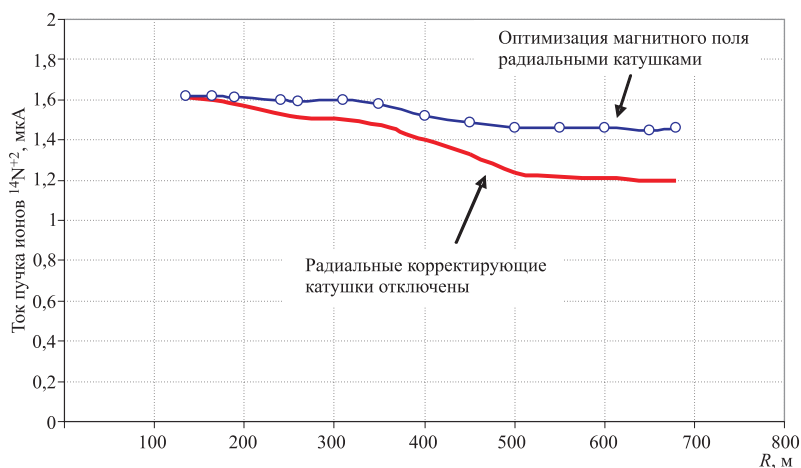


Рис. 7. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  при ускорении в поле 1,62 Тл без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования

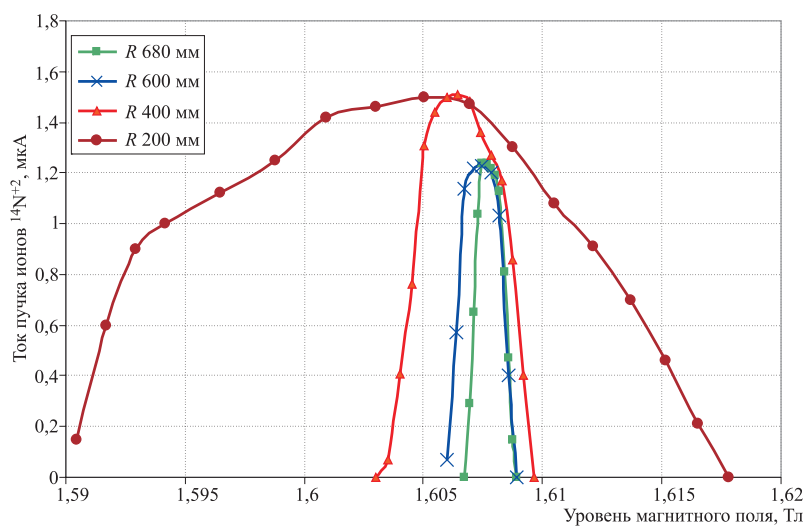


Рис. 8. Зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  от уровня магнитного поля циклотрона без коррекции радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

лила увеличить ток ускоренного пучка на радиусе вывода до 1,46 мкА, а коэффициент прохождения пучка в циклотроне до 90 %.

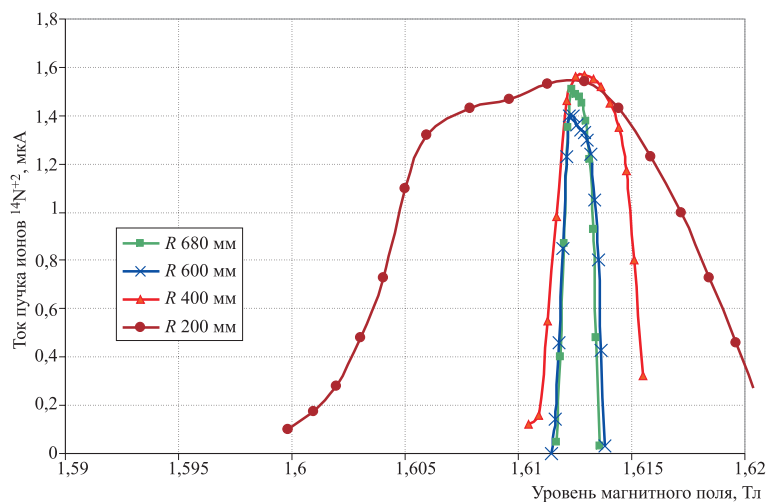


Рис. 9. Зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  от уровня магнитного поля циклотрона при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 800 мм

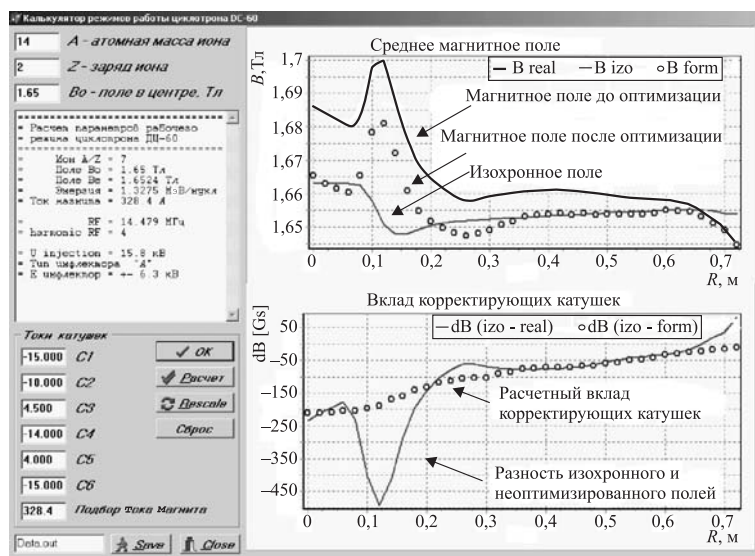


Рис. 10. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$

Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками осуществлялась при помощи программы расчета рабочего режима циклотрона ДЦ-60. На рис. 10 представлено окно программы, отображающее параметры выбранного рабочего режима, токи радиальных корректирующих катушек, графики изохронного и среднего магнитного поля до и после оптимизации радиальными катушками.

#### 4. ТЕСТ №4. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ АРГОНА $^{40}\text{Ar}^{+5}$ ДО ЭНЕРГИИ 0,58 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  до энергии 0,58 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на шестой гармонике ВЧ-поля при среднем магнитном поле 1,25 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 164 А и частоте ускоряющего напряжения 14,42 МГц. После оптимизации режима работы канала аксиальной инжекции ток пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  за анализирующим магнитом составлял 24 мкА.

Ток инжектированного пучка на внутреннем радиусе  $R = 120$  мм, полученный без использования системы банчирования пучка, был равен 1,02 мкА. Это соответствует коэффициенту инжекции пучка в циклотрон  $\approx 4,3$  %.

Проведено исследование ускорения пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  внутри циклотрона от внутреннего радиуса  $R = 120$  мм до конечного радиуса циклотрона  $R = 680$  мм. Рассмотрены два режима работы: с оптимизацией и без оптимизации магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. Результаты исследования приведены в табл. 5 и на рис. 11–14. В режиме работы с отключенными корректирующими катушками ток ускоренного пучка на радиусе вывода  $R = 680$  мм был равен 0,134 мкА. При этом коэффициент

Таблица 5. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+5}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе $R = 120$ мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода $R = 680$ мм, мкА	Эффективность ускорения пучка в циклотроне, %
Корректирующие катушки выключены	1,02	0,134	13,4
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	0,98	0,644	66

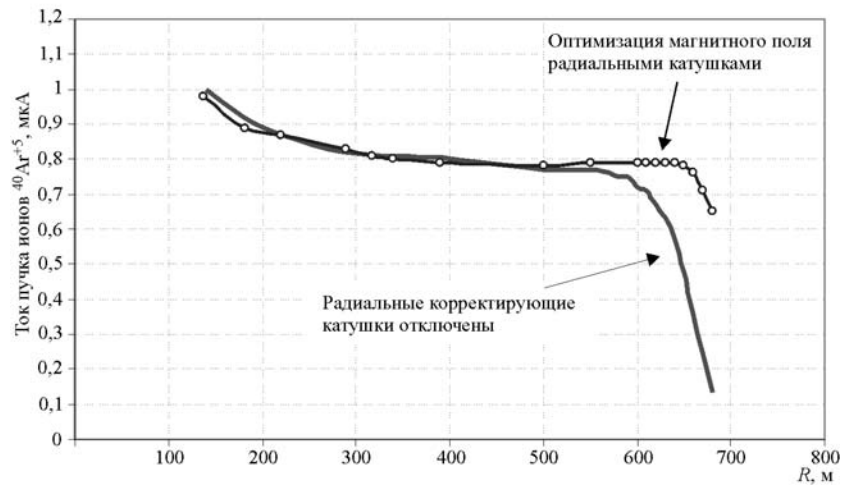


Рис. 11. Радиальная зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  при ускорении в магнитном поле 1,25 Тл без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования

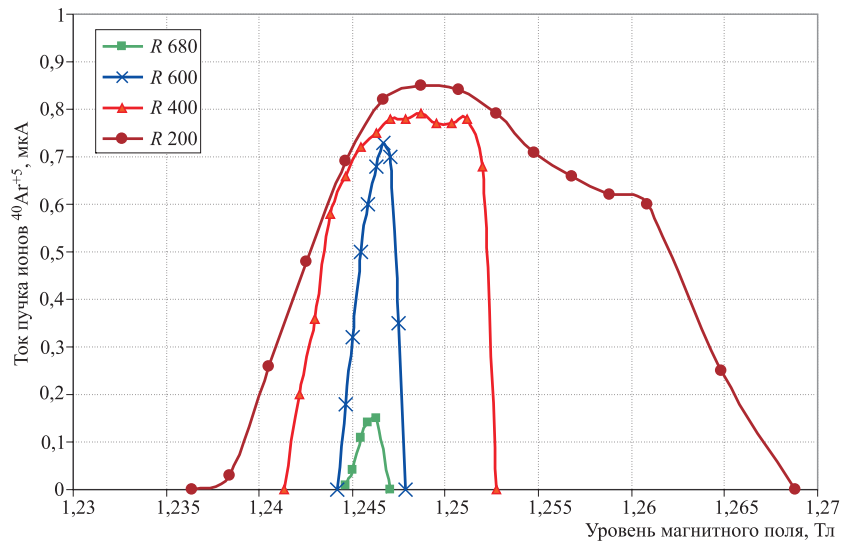


Рис. 12. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  от уровня основного поля без коррекции радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

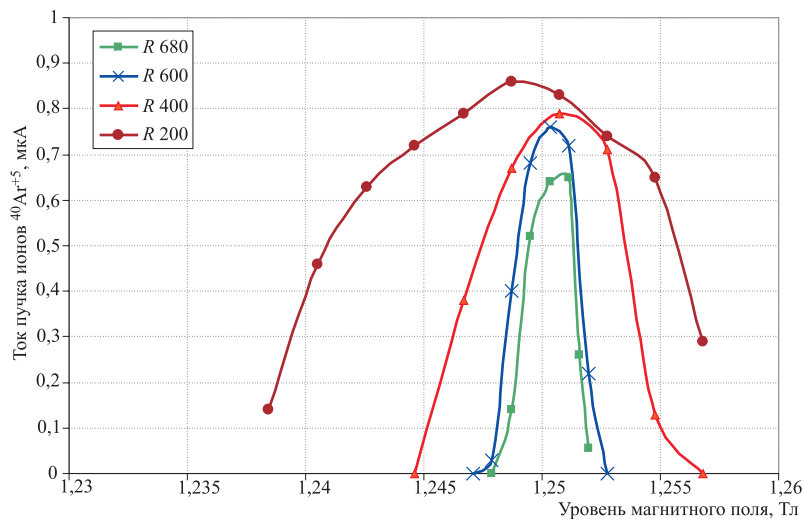


Рис. 13. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  от уровня основного поля при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

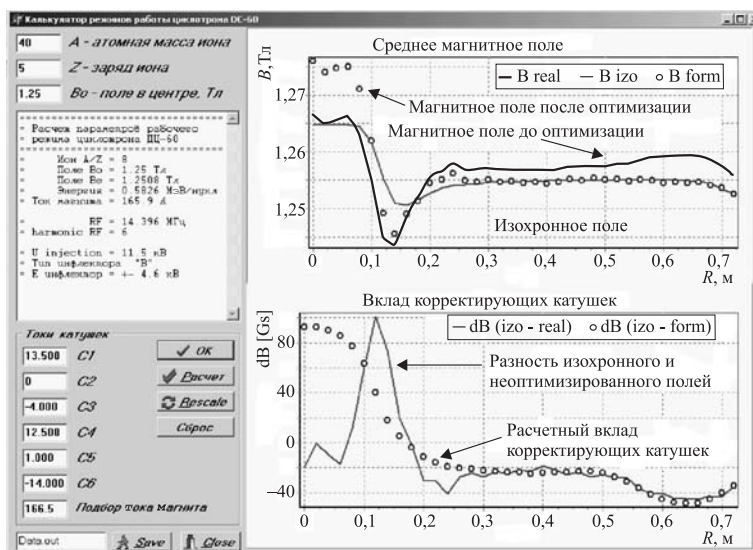


Рис. 14. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+5}$

прохождения пучка в циклотроне от внутреннего до конечного радиуса составил 13,4 %. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позволила увеличить ток ускоренного пучка на радиусе вывода до 0,64 мкА, что соответствует коэффициенту прохождения пучка в циклотроне более 66 %.

### 5. ТЕСТ №5. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ АЗОТА $^{40}\text{Ar}^{+7}$ ДО ЭНЕРГИИ 1,14 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  до энергии 1,14 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ВЧ-поля при среднем магнитном поле 1,25 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 166 А и частоте ускоряющего напряжения 13,6 МГц. В данном режиме работы система банчирувания пучка не использовалась.

После оптимизации режима работы канала аксиальной инжекции ток пучка в канале инжекции после анализирующего магнита составлял 42 мкА. Ток пучка в центре циклотрона на радиусе 120 мм был равен 1,92 мкА. Это соответствует коэффициенту инжекции пучка в циклотрон  $\approx 4,6$  %.

Исследован процесс ускорения пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  внутри циклотрона от внутреннего радиуса ( $R = 120$  мм) до конечного радиуса циклотрона ( $R = 680$  мм). Ускорение проводилось с оптимизацией и без оптимизации магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. Результаты исследования приведены в табл. 6 и на рис. 15–18. В режиме работы с отключенными корректирующими катушками ток ускоренного пучка на радиусе вывода  $R = 680$  мм был равен 1,35 мкА. При этом коэффициент прохождения пучка в циклотроне составил 77 %. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позволила увеличить ток

Таблица 6. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+7}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе $R = 120$ мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода $R = 680$ мм, мкА	Эффективность ускорения пучка в циклотроне, %
Корректирующие катушки выключены	1,76	1,35	77
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	1,92	1,83	95

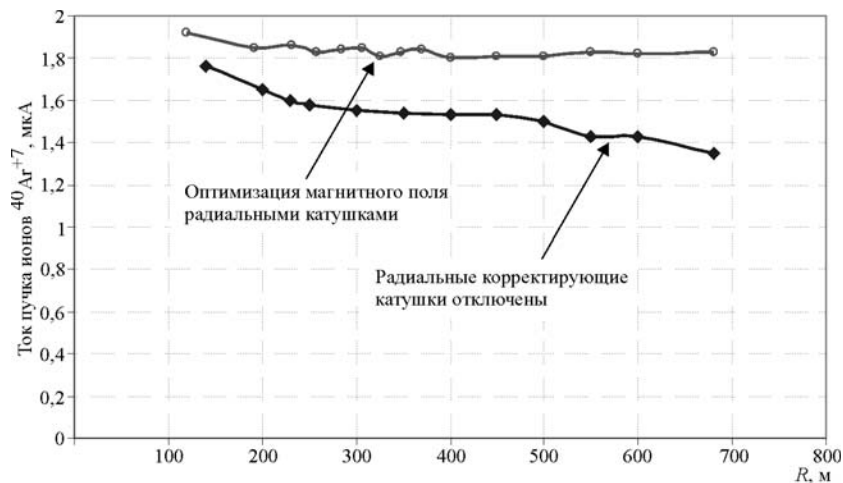


Рис. 15. Радиальная зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  при ускорении в поле 1,26 Тл без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования

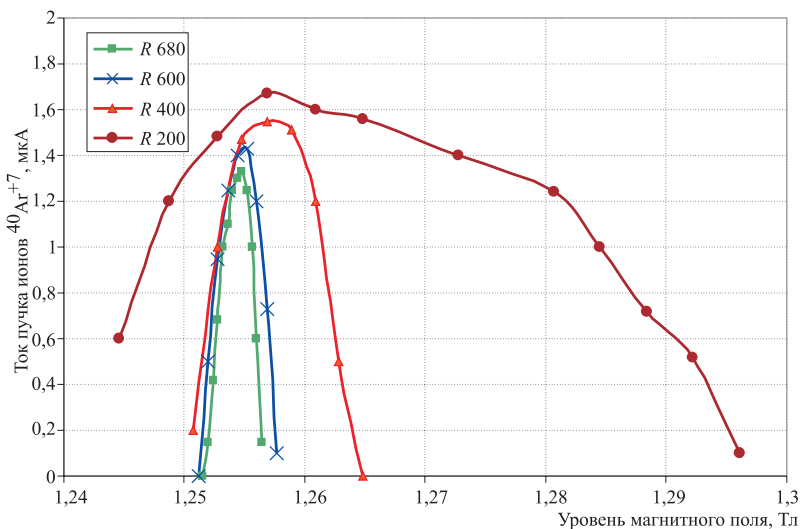


Рис. 16. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  от уровня основного поля без коррекции радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

ускоренного пучка на радиусе вывода до 1,83 мкА, что соответствует коэффициенту прохождения пучка в циклотроне более 95 %.



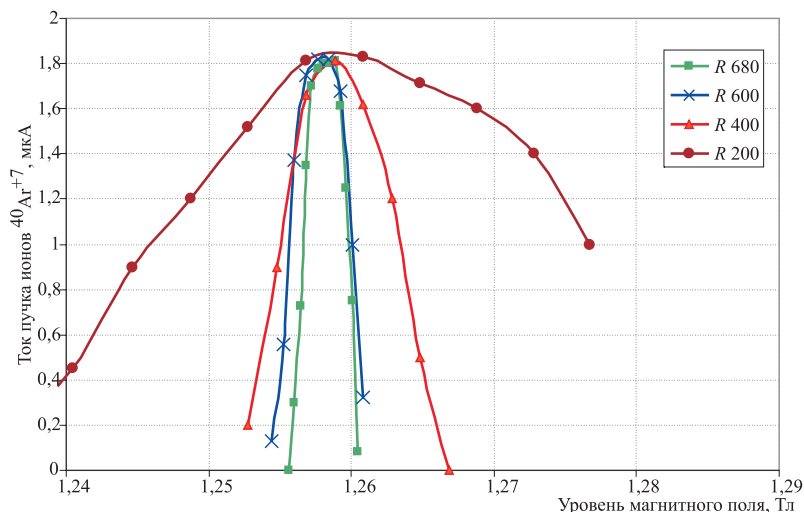


Рис. 17. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  от уровня основного поля при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

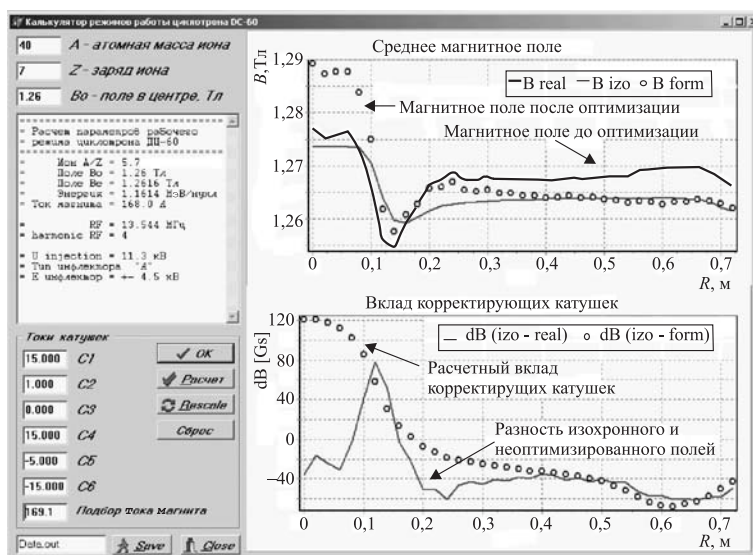


Рис. 18. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$

## 6. ТЕСТ №6. УСКОРЕНИЕ ИОНОВ АЗОТА $^{40}\text{Ar}^{+4}$ ДО ЭНЕРГИИ 0,65 МэВ/нуклон

Исследован процесс ускорения пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  до энергии 0,65 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на шестой гармонике ВЧ-поля при среднем магнитном поле 1,64 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 311 А и частоте ускоряющего напряжения 15,2 МГц. В данном режиме работы система банчирования пучка не использовалась.

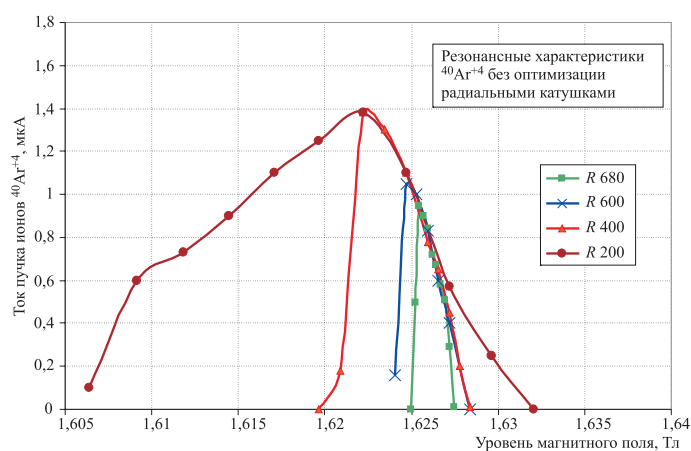


Рис. 19. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  от уровня основного поля без оптимизации радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

Таблица 7. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+4}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе $R = 120$ мм, мкА	Ток пучка на радиусе вывода $R = 680$ мм, мкА	Эффективность ускорения пучка в циклотроне, %
Корректирующие катушки выключены	1,27	0,98	77
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	1,5	1,4	93

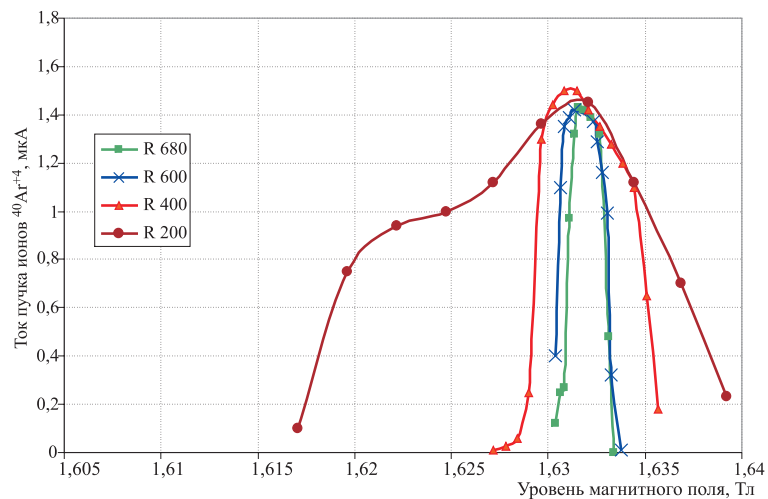


Рис. 20. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  от уровня основного поля при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса: 200, 400, 600 и 680 мм

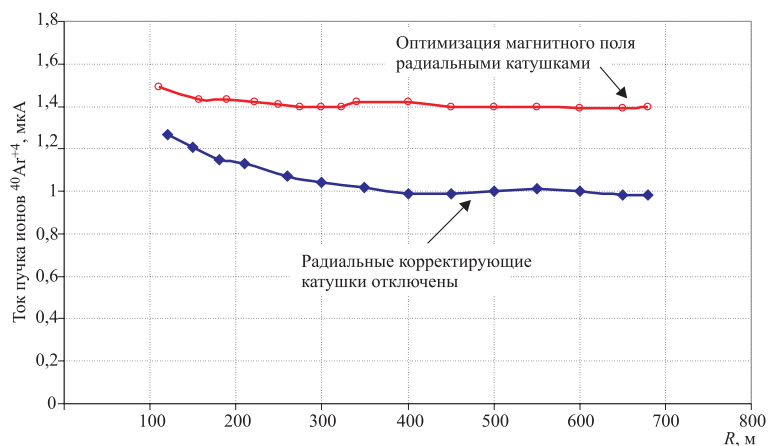


Рис. 21. Радиальная зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  при ускорении в поле 1,64 Тл без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования

Ускорение проводилось с оптимизацией и без оптимизации магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. Результаты исследования приведены в табл. 7 и на рис. 19–22.

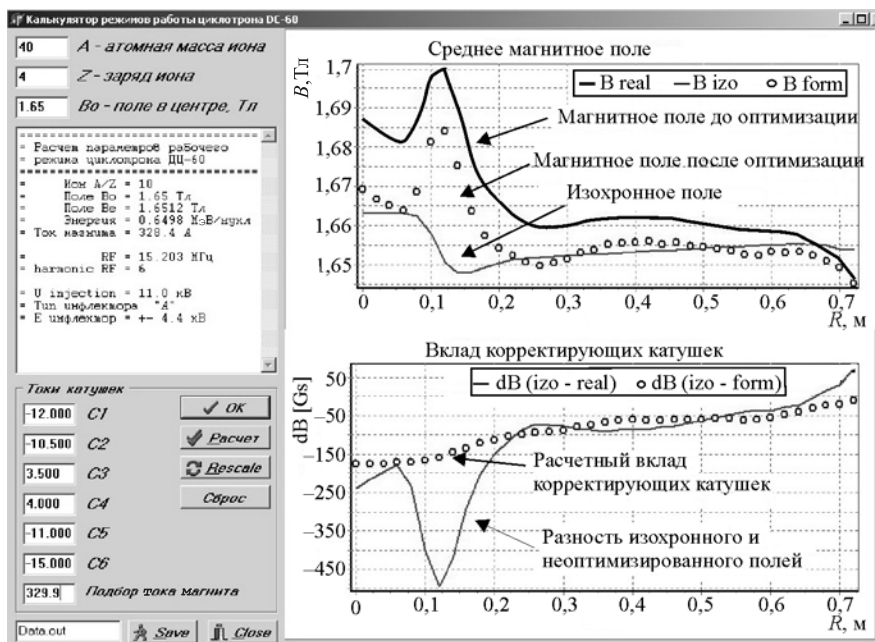


Рис. 22. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе пусконаладочных работ проведены эксперименты по ускорению пучков ионов азота, аргона, криптона ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ ) на различных уровнях магнитного поля 1,25–1,65 Тл в режимах работы на четвертой и шестой гармониках частоты ускоряющей системы. В ходе экспериментов проведены исследования зависимости тока ускоряемого пучка от уровня магнитного поля (резонансные кривые), изучено распределение тока пучка по радиусу, влияние подстройки магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. После оптимизации режима работы систем циклотрона получены проектные параметры ускорения и вывода пучков ионов в соответствии с рабочей диаграммой. Сформированное магнитное поле позволило осуществить ускорение пучков ионов с эффективностью до 96 % от внутреннего радиуса ( $R = 120$  мм) до конечного радиуса циклотрона ( $R = 680$  мм).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гикал Б. Н. и др.* Обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л. Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Отчёт. Алма-Ата, 2003.
2. *Gikal B. N. et al.* Project of the DC-60 Cyclotron with Smoothly Ion Energy Variation for Research Center at L. N. Gumilev EuroAsia State University in Astana (Kazakhstan), Proceedings of the 17th Conference on Cyclotrons and Their Applications, 18–22 October 2004, Tokyo. P. 205–207.
3. *Гикал Б. Н. и др.* Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60. ОИЯИ, Р9-2006-151. Дубна, 2006.
4. *Ivanenko I. A.* Design of Cyclotron DC-60 Magnetic Field // Lectures of PNPI School on Accelerator Physics and Techniques, February 15–19, St. Petersburg, Repino, 2006.
5. *Gikal B. et al.* Numerical simulation for field formation in cyclotron DC-60 // Proceedings of the 11th International Conference on Charged Particle Accelerators Applied in Medicine and Industry, 10–14 October 2004, JINR, Dubna. P. 257–259.

Получено 4 июня 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 05.09.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,60. Тираж 290 экз. Заказ № 55870.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)