

## КОРРЕКЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА ПРИ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-110

*Б. Н. Гикал, И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов,  
И. В. Калагин, В. И. Миронов, Е. В. Самсонов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разработан и создан специализированный циклотрон тяжелых ионов ДЦ-110 для научно-производственного комплекса БЕТА в г. Дубне (Россия), который позволяет получать интенсивные пучки ускоренных ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон. Пусконаладочные работы на циклотронном комплексе, в ходе которых были получены проектные параметры, проведены в конце 2012 г.

В процессе наладки ускорителя было обнаружено вертикальное смещение пучка на конечных радиусах ускорения и при его выводе. Показано, что основной причиной такого смещения явилось возникновение радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости магнита, вызванное асимметрией магнитопровода. Коррекция вертикального смещения пучка проведена с помощью создания асимметрии тока в основной обмотке электромагнита ДЦ-110.

The specialized heavy ion cyclotron DC-110 has been designed and created by the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research for the research and production complex BETA placed in Dubna (Russia). DC-110 cyclotron is intended for accelerating the intense Ar, Kr, Xe ion beams with fixed energy of 2.5 MeV/nucleon. The commissioning of DC-110 cyclotron was carried out at the end of 2012. The project parameters of the ion beams have been achieved.

During commissioning of cyclotron the vertical displacement of the beam at the last orbits and at the extraction channel was revealed. The calculations and experiments have shown that the reason of this displacement is the radial component of magnetic field at the median plane of the cyclotron, which appears because of asymmetry of the magnetic yoke. Correction of the vertical displacement of the beam has been achieved by creating an asymmetry of current distribution in the main coils of the electromagnet.

PACS: 29.20.dg; 29.27.Eg

### ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разработан и создан изохронный циклотрон тяжелых ионов ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран. В 2012 г. ускорительный комплекс ДЦ-110 введен в эксплуатацию. Циклотрон оснащен источником ионов электронно-циклотронного резонанса и позволяет получать интенсивные пучки ускоренных ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон [1]. При проведении пусконаладочных работ на ускорителе было обнаружено, что на конечных радиусах ускорения и при выводе пучок ионов приобретает вертикальное смещение,

приводящее к апертурным потерям. Расчетным путем показано, что основной причиной такого смещения явилось возникновение радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости магнита, что вызвано асимметрией магнитопровода. Проведенная коррекция магнитного поля позволила скомпенсировать влияние радиальной компоненты и восстановить положение пучка в медианной плоскости.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА ПУЧКА В ПРОЕКТНОМ ВАРИАНТЕ (ПРИ СИММЕТРИЧНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЦИКЛОТРОНА)

После запуска ускорителя в проектном варианте были проведены исследования положения и размеров пучка в процессе вывода. Исследования выполнены на пучке  $^{136}\text{Xe}^{20+}$  интенсивностью 2,5 мкА на конечном радиусе ускорения.

Положение и размеры пучка в зоне вывода изучались по следам, которые оставил пучок на конструктивных элементах внутри камеры циклотрона. Фотография на рис. 1 показывает смещение орбиты пучка на входе в дефлектор вверх от медианной плоскости. Величина смещения равна 3 мм. На выходе из магнитного канала смещение достигает 5 мм из-за дефокусирующего действия градиента магнитного поля канала, увеличивающего отклонение пучка по вертикали. На люминофоре, установленном на начальном участке ионопровода, зарегистрировано отклонение пучка вверх на 16 мм (рис. 2). Горизонтальный размер пучка на люминофоре приблизительно равен 25 мм, вертикальный — 20 мм.

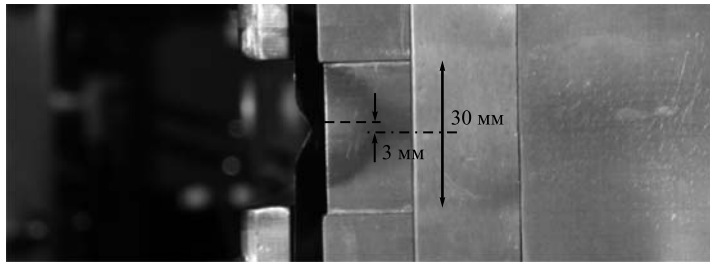


Рис. 1. Положение пучка на входе в дефлектор,  $R = 894$  мм

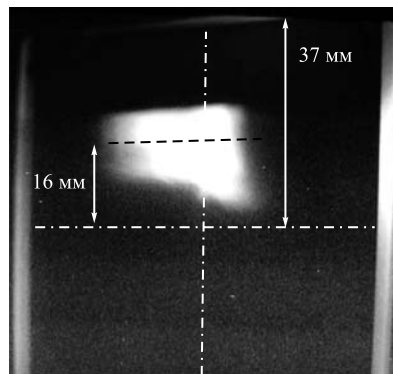


Рис. 2. Фотография пучка на люминофоре в выводном патрубке без коррекции пучка

Таблица 1. Смещение пучка от средней плоскости магнита циклотрона (эксперимент)

Вход в дефлектор ( $R = 894$ мм)	Выход из магнитного канала	Люминофор в начале канала транспортировки
3 мм вверх	5 мм вверх	16 мм вверх

Вертикальное смещение пучка приводит к апертурным потерям, которые наблюдаются на выходе из дуанта, где вертикальная аппретура составляет 34 мм. Вертикальная апертура выводного патрубка — 40 мм, на прохождение пучка не влияет. Измеренное вертикальное смещение пучка по траектории вывода из циклотрона содержится в табл. 1.

## 2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ МАГНИТА НА ДВИЖЕНИЕ ПУЧКА В ЗОНЕ ВЫВОДА ИЗ ЦИКЛОТРОНА

Одной из основных причин аксиального смещения пучка на выходе из циклотрона является наличие  $B_r$ -компоненты магнитного поля в средней плоскости магнита, возникающей вследствие асимметрии магнитной структуры циклотрона.

Для оценки влияния асимметрии аксиального канала на магнитное поле построена электронная 3D-модель циклотрона ДЦ-110. Модель, показанная на рис. 3, а, представляет 1/4-ю часть магнита циклотрона ДЦ-110 с асимметричным аксиальным каналом. Расчеты магнитного поля проводились при помощи программы TOSCA [2]. Результаты расчета находятся в хорошем соответствии с результатами магнитных измерений, проведенных при формировании магнитного поля циклотрона ДЦ-110 (рис. 4). Отличие результатов, полученных в ходе расчетов и при измерении магнитного поля, не превышает 0,2 % в основной области ускорения и 0,5 % в центре циклотрона.

В соответствии с чертежами электромагнита циклотрона ДЦ-110 элементом асимметрии является аксиальный канал в балках и полюсах магнита. На рис. 3, а показано, что

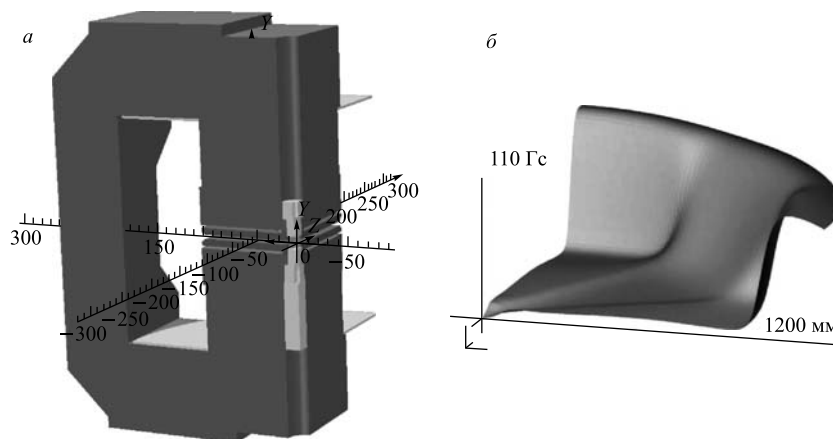


Рис. 3. а) Модель 1/4-й части магнита циклотрона ДЦ-110 с асимметричным аксиальным каналом (асимметричная часть канала выделена светло-серым цветом). б) Распределение  $B_r$  ( $B_r(\max) = 110$  Гс) компоненты поля в медианной плоскости циклотрона ДЦ-110 в области ускорения

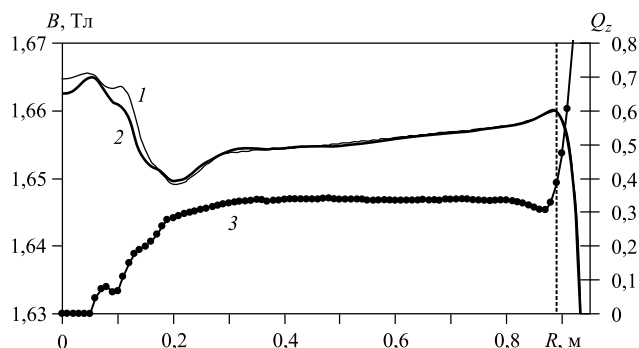


Рис. 4. Радиальное распределение среднего магнитного поля: 1 — измеренное; 2 — расчетное; 3 — частота вертикальных бетатронных колебаний

аксиальный канал в нижнем полюсе магнита заполнен железом, в то время как верхний канал свободен для установки системы аксиальной инжекции.

Результаты проведенных расчетов показали, что аксиальная асимметрия магнита циклотрона ДЦ-110 приводит к появлению радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  в средней плоскости магнита (рис. 3, б). Так как магнит циклотрона ДЦ-110 имеет четырехсекторную структуру, то помимо среднего значения радиальной компоненты  $\langle B_r \rangle$  появляются ее четные гармоники, и прежде всего четвертая  $B_{r4}$  (рис. 5).

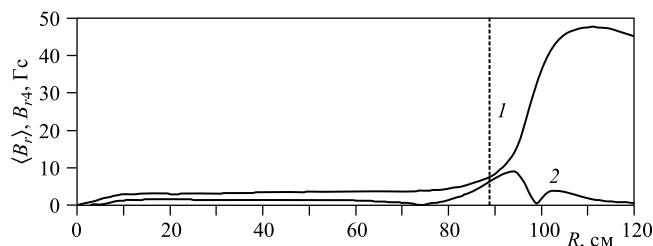


Рис. 5. Радиальная компонента магнитного поля в медианной плоскости магнита: 1 — среднее значение  $\langle B_r \rangle$ ; 2 — четвертая гармоника  $B_{r4}$

Возмущения аксиального движения ионов определяются средним значением, первой  $B_{1r}$  и четвертой  $B_{4r}$  гармониками радиальной компоненты магнитного поля в средней плоскости магнита. Среднее значение и четвертая гармоника приводят к смещению плоскости, относительно которой происходят аксиальные колебания при сохранении их амплитуды, а первая гармоника вызывает появление когерентных колебаний пучка относительно средней плоскости магнита. Оценить возмущения аксиального движения пучка до радиуса вывода можно по следующим формулам [3]:

$$\Delta Z(B_r) = \frac{r B_r}{B_z Q_z^2}, \tag{1}$$

$$\Delta Z(B_{4r}) = \frac{r B_{4r} B_{4z}}{B_z^2 Q_z^2 (N^2 - (1 + n))}, \tag{2}$$

$$\Delta Z(B_{1r}) = \frac{r B_{1r}}{B_z (1 - Q_z^2)}. \tag{3}$$

В соответствии с формулами (1)–(3) в табл. 2 приведена оценка аксиального смещения пучка на радиусе вывода  $R_{\text{ext}} = 0,89$  м, на котором значение среднего поля  $B_z = 1,66$  Тл, а частота вертикальных бетатронных колебаний  $Q_z = 0,38$ . Значение первой

**Таблица 2. Оценка аксиального смещения пучка под воздействием радиальной компоненты магнитного поля на радиусе вывода  $R_{\text{ext}} = 0,89$  м**

$\langle B_r \rangle = 7,7$ Гс	$\Delta Z \approx 2,8$ мм
$B_{r4} = 7$ Гс	$\Delta Z \approx 0,06$ мм
$B_{r1} = 1$ Гс	$\Delta Z \approx 0,06$ мм

гармоники радиальной компоненты взято произвольно из предположения, что она не может превышать значения первой гармоники основной компоненты поля  $B_{z1} = 3$  Гс.

Из табл. 2 видно, что основной вклад в смещение пучка вносит среднее значение радиальной компоненты магнитного поля  $\langle B_r \rangle$ . Вкладом в смещение пучка первой и четвертой гармоник  $B_{r1}$ ,  $B_{r4}$  можно пренебречь в силу их малой величины.

Величину первой гармоники  $B_{r1}$  можно оценить только при внесении соответствующей асимметрии в полную модель электромагнита, например, асимметрии магнитного канала системы вывода пучка. В используемой модели магнита такая асимметрия не рассматривается.

Таким образом, пучок на конечном радиусе получает вертикальное смещение за счет  $B_r$ -компоненты магнитного поля. В дальнейшем это смещение усиливается в магнитном канале, что приводит к апертурным потерям выведенного пучка в канале транспортировки. Оценку воздействия градиента магнитного поля на вертикальное смещение пучка можно сделать по формуле

$$\Delta Z' = \frac{GL}{B\rho} \Delta Z_0. \quad (4)$$

Из предыдущих оценок имеем вертикальное смещение пучка на входе в магнитный канал  $\Delta Z = 0,0028$  м. Средний градиент поля в канале  $G = 7$  Тл/м, эффективная длина канала  $L = 0,47$  м. Для магнитной жесткости пучка на радиусе вывода  $B\rho = 1,66$  Тл·0,9 м из (4) получаем угол вертикального отклонения пучка на выходе из магнитного канала  $\Delta Z' \approx 0,006$  рад. На длине пробега  $S = 1,1$  м до люминофора в начальной части линии транспортировки вертикальное смещение составит  $\Delta Z_L = \Delta Z + L\Delta Z' \approx 0,01$  м. Экспериментальное и расчетное смещение пучка от средней плоскости магнита циклотрона в проектном варианте приведено в табл. 3.

**Таблица 3. Смещение пучка от средней плоскости в проектном варианте**

Вариант	Вход в дефлектор ( $R = 894$ мм)	Люминофор в начале канала транспортировки
Эксперимент	3 мм вверх	16 мм вверх
Оценочный расчет	2,8 мм вверх	10 мм вверх

Полученная оценка находится в хорошем согласии с результатами эксперимента. Это дает основание предполагать, что основная причина смещения пучка при его выводе из циклотрона — наличие  $B_r$ -компоненты магнитного поля в средней плоскости магнита, возникающей вследствие асимметрии магнитной структуры циклотрона.

### 3. ПАРАМЕТРЫ ОСНОВНОЙ ОБМОТКИ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-110

Основная обмотка циклотрона ДЦ-110 состоит из верхней и нижней катушек. Расстояние между катушками 990 мм. Поперечные размеры катушек  $730 \times 600$  мм. В каждой катушке 180 витков. Проводник — алюминиевая труба квадратного сечения  $46 \times 46$  мм с отверстием для охлаждающей воды  $\varnothing 20$  мм. Каждая катушка состоит из шести отдельных секций по 30 витков в каждой. В экспериментах по коррекции вертикального смещения пучка использовалась возможность шунтирования или полного отключения отдельно взятой секции.

### 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ПУЧКА ПУТЕМ ШУНТИРОВАНИЯ ОДНОЙ ИЗ СЕКЦИЙ КАТУШКИ ОСНОВНОЙ ОБМОТКИ ЦИКЛОТРОНА

В процессе пусконаладочных работ на циклотроне ДЦ-110 эксперименты по компенсации вертикального смещения выведенного пучка сопровождались соответствующими расчетами. На аксиально-симметричной модели магнита циклотрона было проведено исследование радиальной компоненты магнитного поля, возникающей при полном или частичном (путем шунтирования) отключении секции нижней катушки основной обмотки электромагнита. При этом ток в обмотке магнита увеличивался для сохранения общего числа ампер-витков. Полное отключение означает ток секции 0 А. Частичное отключение одной секции катушки в расчетной модели означает, что ток этой секции составляет 200 А, в то время как ток остальных секций — около 1000 А. Такие условия были воспроизведены в проведенных экспериментах.

По результатам расчетов проведены оценки влияния полученной радиальной компоненты магнитного поля на вертикальное положение выведенного пучка. Частичное или полное отключение секции катушки приводит к появлению  $B_r$ -компоненты магнитного поля (рис. 6). При отключении соответствующих секций нижней катушки  $B_r$ -компонента будет иметь противоположный знак, что приведет к компенсации влияния аксиальной асимметрии магнита. Оценочные значения аксиального смещения пучка даны в табл. 4.

Оценки смещения пучка, основанные на расчетных значениях  $B_r$  поля, приведенные в табл. 4, показывают возможность эффективной коррекции вертикального смещения

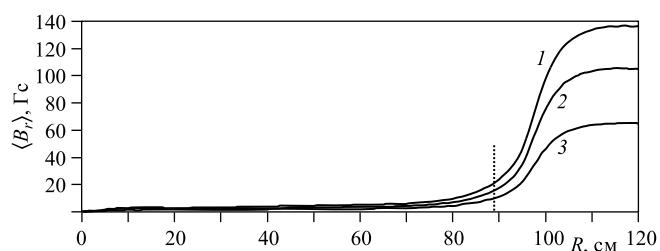


Рис. 6. Среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в случаях: 1 — полного отключения (ток 0 А) нижней секции нижней катушки магнита; 2 — частичного отключения нижней секции (ток 200 А); 3 — частичного отключения верхней секции (ток 200 А)

Таблица 4. Оценка радиальной компоненты магнитного поля  $\langle B_r \rangle$  и аксиального смещения пучка на радиусе вывода  $R_{\text{ext}} = 0,89$  м и в канале транспортировки при частичном или полном отключении секций катушки магнита<sup>1</sup>

Вариант отключения секций нижней катушки магнита	$\langle B_r \rangle$ , Гс ( $R_{\text{ext}}$ )	$\Delta Z$ , мм ( $R_{\text{ext}}$ )	$\Delta Z_L$ , мм
Ток верхней секции 200 А	10	3,	13
Ток нижней секции 200 А	15,7	5,8	20
Ток нижней секции 0 А	21	7,8	27

пучка с помощью шунтирования или полного отключения секций катушки циклотрона. Причем оценка положения центра пучка на люминофоре в линии транспортировки показывает достаточно большой запас, позволяющий скорректировать влияние неучтенных в расчете железных масс элементов системы вывода и линии транспортировки.

Помимо отключения секций основной обмотки электромагнита также исследовалось влияние асимметричного питания верхней и нижней катушек ( $\Delta I = 5\%$ ), смещение верхней катушки к медианной плоскости на 5 мм и наличие платформы источника ионов с защитным магнитным экраном, выполненным из стальных листов толщиной 20 мм. Среднее значение  $B_r$ -компоненты магнитного поля, возникающей вследствие воздействия этих факторов, представлено на рис. 7.

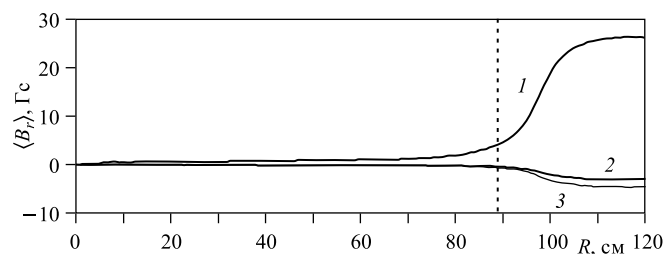


Рис. 7. Среднее значение радиальной компоненты магнитного поля в случаях: 1 — асимметрии токов в катушках 5%; 2 — при смещении верхней катушки на 5 мм; 3 — с учетом размещения магнитного экрана платформы ECR-источника

Таблица 5. Оценка аксиального смещения пучка под воздействием радиальной компоненты магнитного поля на радиусе вывода  $R_{\text{ext}} = 0,89$  м и в канале транспортировки

Вариант	$\langle B_r \rangle$ , Гс ( $R_{\text{ext}}$ )	$\Delta Z$ , мм ( $R_{\text{ext}}$ )	$\Delta Z_L$ , мм
Асимметрия тока верхней и нижней катушек 5%	4	1,5	5
Смещение катушки 5 мм	0,5	0,2	0,7
Экран платформы ECR	0,7	0,3	1

<sup>1</sup>Ток остальных секций катушки — около 1000 А.

Расчеты показали, что возможное аксиальное смещение катушек электромагнита в пределах точности их установки, а также наличие платформы источника ионов не оказывает значительного влияния на вертикальное положение выводимого пучка ионов (табл.5). Напротив, асимметричное питание верхней и нижней катушек может быть использовано для оперативной коррекции вертикального положения пучка.

## 5. ПОЛОЖЕНИЕ ПУЧКА НА КОНЕЧНЫХ РАДИУСАХ УСКОРЕНИЯ

Целью эксперимента являлось изучение влияния шунтирования наиболее и наименее удаленных от медианной плоскости секций нижней катушки циклотрона на положение пучка в зоне радиуса вывода 893 мм. Отключение этих секций осуществлялось с помощью шунтирования ее выводов переключателем. Несимметричность ампер-витков верхней и нижней катушек составляет около 7%, поскольку примерно 20% тока, около 200 А, течет через шунтированную секцию из-за ее низкого сопротивления.

Для измерения положения пучка на радиусе вывода использовались тонкие титановые пластинки, которые устанавливались на измерительную часть внутреннего пробника. Отпечатки пучка получены для трех режимов (рис. 8):

- 1) при симметричном включении основной обмотки циклотрона;
- 2) при шунтированной нижней секции нижней катушки, ток в секции 200 А;
- 3) при шунтированной верхней секции нижней катушки, ток в секции 200 А.

Измеренное смещение пучка на конечном радиусе ускорения приведено в табл. 6.

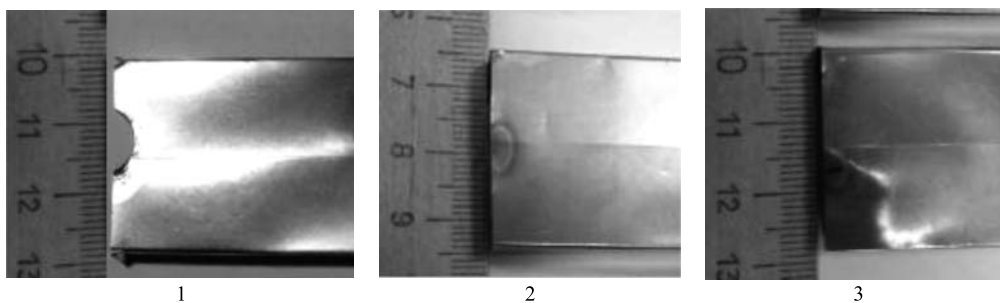


Рис. 8. Фотографии пластин с отпечатками пучка на радиусе 893 мм

Таблица 6. Положение пучка относительно середины зазора в магните

Режим	Положение пучка относительно середины зазора	Смещение пучка относительно режима с симметричным включением катушек
Симметричное включение катушек. Ток всех секций 975 А	3 мм вверх	0 мм
Нижняя секция нижней катушки, ток 200 А	0 мм	3 мм вниз
Верхняя секция нижней катушки, ток 200 А	3 мм вниз	6 мм вниз



## 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА ПУЧКА В ЗОНЕ ВЫВОДА ИЗ ЦИКЛОТРОНА ПРИ ШУНТИРОВАНИИ СЕКЦИЙ НИЖНЕЙ КАТУШКИ ОСНОВНОЙ ОБМОТКИ ЦИКЛОТРОНА

Целью эксперимента являлось изучение влияния шунтирования наиболее и наименее удаленных от медианной плоскости секций нижней катушки циклотрона на положение пучка в зоне вывода.

При шунтировании секции внешним сопротивлением остаточный ток в секции равнялся 200 А. Для сохранения общего числа ампер-витков ток обмотки циклотрона был увеличен с 975 до 1067 А.

Шунтирование нижней секции нижней катушки основной обмотки циклотрона привело к уменьшению смещения пучка на люминофоре на 8 мм в сравнении с режимом симметричного включения обмотки циклотрона (рис. 9).

Шунтирование верхней секции, наиболее близко расположенной к медианной плоскости циклотрона, оказывает более сильное влияние на магнитное поле в медианной плоскости. Экспериментально исследовалось два варианта.

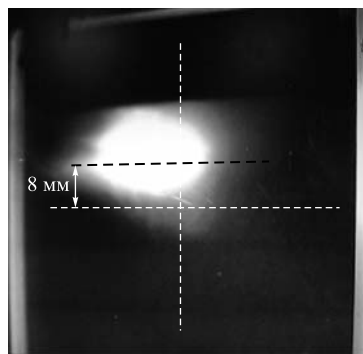


Рис. 9. Фотография пучка на люминофоре в выводном патрубке при закороченной нижней секции нижней катушки основной обмотки циклотрона

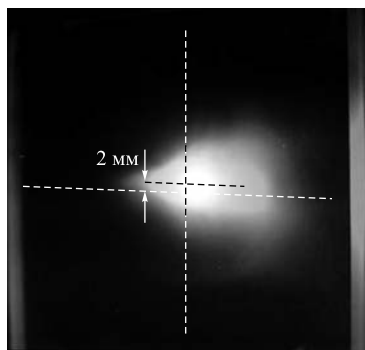


Рис. 10. Фотография пучка на люминофоре в выводном патрубке при шунтировании верхней секции нижней катушки основной обмотки циклотрона (остаточный ток 200 А)

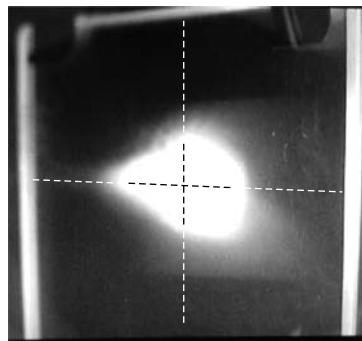


Рис. 11. Фотография пучка на люминофоре в выводном патрубке при отключенной верхней секции нижней катушки основной обмотки циклотрона

**Вариант 1.** Шунтирование верхней секции нижней катушки внешним сопротивлением. Остаточный ток секции 200 А. В этом случае смещение пучка на люминофоре в выводном патрубке уменьшается с 16 мм (при симметричном включении обмотки циклотрона) до 2 мм (рис. 10).

**Вариант 2.** Полное отключение верхней секции нижней катушки. Ток через отключенную секцию равен 0 А. Отключение верхней секции катушки приводит также к геометрическому смещению середины нижней катушки на 5 см от медианной плоскости циклотрона. Несимметричность ампер-витков верхней и нижней катушек составляет 9%. При полном отключении верхней секции ток основной обмотки увеличивается до 1087 А. В этом случае пучок находится в центре люминофора (рис. 11), т.е. в середине ионопровода.

Вариант коррекции вертикального положения пучка на выводе их циклотрона ДЦ-110 с помощью полного отключения верхней секции нижней катушки основной обмотки принят как рабочий. В этом случае пучок идет по оси ионопровода без вертикального угла отклонения. Это видно по люминофору в патрубке вывода (рис. 11) и профиломеру, расположенному в первом блоке диагностики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для размещения системы аксиальной инжекции в верхней балке и полюсе магнита циклотрона ДЦ-110 сделано аксиальное отверстие диаметром 300 мм. Нижний полюс магнита такого канала не имеет. Такая асимметрия вызвала появление радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$ , что привело к вертикальному смещению пучка на конечном радиусе ускорения 3 мм. Магнитный канал системы вывода усиливает смещение пучка, в результате на люминофоре в начальной части канала транспортировки смещение достигает 16 мм вверх относительно оси ионопровода.

Для компенсации смещения пучка в зоне вывода использован эффект смещения медианной плоскости за счет несимметричного включения верхней и нижней катушек основной обмотки циклотрона. Найден оптимальный вариант компенсации вертикального смещения пучка путем отключения верхней секции нижней катушки. В результате траектория выведенного пучка совпала с осью ионопровода. Для сохранения рабочего уровня магнитного поля при отключении одной секции ток обмотки был увеличен с 975 до 1087 А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гикал Б. Н. и др. Проект циклотрона тяжелых ионов DC-110 для промышленного применения и прикладных исследований в области нанотехнологий // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, № 7(163). С. 891–896
2. [www.cobham.com/technicalservices](http://www.cobham.com/technicalservices)
3. Заплатин Н. Л. и др. Определение и коррекция положения медианной поверхности магнитного поля фазотрона ОИЯИ. Сообщ. ОИЯИ. Р9-82-925. Дубна, 1982.

Получено 3 июля 2013 г.