

## РАСЧЕТ ВЫВОДА ПУЧКА ИЗ ЦИКЛОТРОНОВ TR-24 И ДЦ-140

*Н. Ю. Казаринов<sup>1</sup>, Г. Г. Гульбекян, И. А. Иваненко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрен вывод пучка из циклотронов двумя основными методами — перезарядной фольгой и электростатическим дефлектором. Представлены результаты расчетов для двух циклотронов: TR-24 (IPHC, Страсбург, Франция) — вывод перезарядкой — и ДЦ-140 (ЛЯР ОИЯИ, Дубна) — вывод дефлектором.

The beam extraction from the cyclotrons by means of two basic methods — stripping foil and electrostatic deflector is considered. The results of computation for two cyclotrons — TR-24, IPHC, Strasbourg, France (stripping foil extraction) and DC-140, FLNR JINR, Dubna (electrostatic deflector extraction) are presented.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

Вывод ускоренного пучка ионов из изохронного циклотрона осуществляется двумя основными методами: 1) с помощью перезарядной фольги и 2) электростатическим дефлектором. Вывод перезарядкой имеет высокую эффективность при ускорении ионов  $H^-$ , в то время как для тяжелых ионов с относительно небольшой энергией его эффективность существенно уменьшается. В этом случае используется электростатический дефлектор, обеспечивающий достаточно высокую эффективность вывода.

В работе приводится метод расчета вывода ускоренного пучка, основанный на вычислении замкнутых орбит в окрестности выводного устройства, определении распределения выведенных частиц на его входе и моделировании транспортировки частиц по орбите вывода.

Представлены результаты расчетов для двух циклотронов: TR-24 (IPHC, Страсбург, Франция) и ДЦ-140 (ЛЯР ОИЯИ, Дубна).

В циклотроне TR-24 [1] ускоряются ионы  $H^-$  до энергии 18–24 МэВ. Пучок ионов используется для производства радиоизотопов и фундаментальных исследований в радиобиологии и медицине. Вывод пучка из циклотрона TR-24 осуществляется с помощью перезарядки.

Циклотрон ДЦ-140 является базовым для создаваемого в ЛЯР ОИЯИ комплекса, предназначенного для решения широкого круга прикладных задач. Циклотрон ДЦ-140 — модернизация циклотрона ДЦ-72, спроектированного и созданного в ЛЯР

---

<sup>1</sup>E-mail: nyk@jinr.ru

ОИЯИ [2] для Республики Словакии. Пучки ионов от  $^{20}\text{Ne}$  до  $^{209}\text{Bi}$  будут использоваться для тестирования на радиационную устойчивость микросхем, облучения полимерных пленок для производства ядерных фильтров и решения других задач прикладной физики. Вывод пучка из циклотрона ДЦ-140 осуществляется электростатическим дефлектором.

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЦИКЛОТРОНА

Магнитное поле циклотрона TR-24 обеспечивает изохронизм движения иона во всей рабочей области. Распределение среднего магнитного поля циклотрона TR-24 (кривая 1) и изохронного магнитного поля (кривая 2) показано на рис. 1.

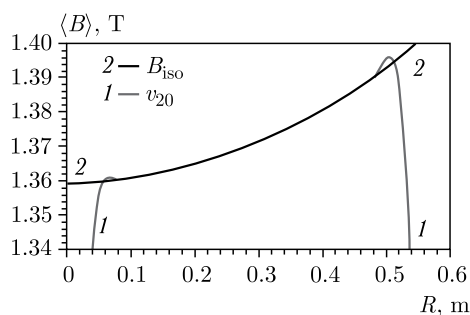


Рис. 1. Магнитное поле циклотрона TR-24

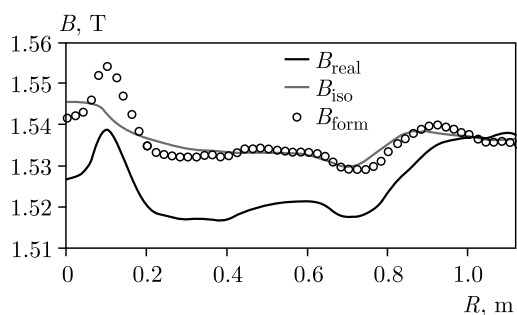


Рис. 2. Магнитное поле циклотрона ДЦ-140

Магнитное поле циклотрона ДЦ-140 в рабочем диапазоне радиусов формируется с помощью варьирования тока основных и 10 корректирующих катушек. Магнитное поле циклотрона ДЦ-140, сформированное для ускорения ионов  $^{209}\text{Bi}^{38+}$ , показано на рис. 2 (кривая  $B_{\text{form}}$ ). На этом же рисунке кривая  $B_{\text{real}}$  — магнитное поле, сформированное основными катушками; кривая  $B_{\text{iso}}$  — изохронное магнитное поле.

### ЗАМКНУТАЯ И ВЫВОДНАЯ ОРБИТЫ

На рис. 3 показаны замкнутые и выводные орбиты циклотрона TR-24, соответствующие энергиям ионов  $\text{H}^-$  в интервале  $18 < W_{\text{ex}} < 24$  МэВ. Замкнутая (кривая 1) и выводная (кривая 2) орбиты циклотрона ДЦ-140, соответствующие выводу ионов  $^{209}\text{Bi}^{38+}$  с энергией  $W_{\text{ex}} = 4,8$  МэВ/нуклон, показаны на рис. 4. На этом же рисунке приведено положение на орбите вывода электростатического дефлектора ESD и двух магнитных каналов МС1, 2, обеспечивающих фокусировку пучка.

### ПАРАМЕТРЫ ОРБИТ

Основными параметрами замкнутой орбиты являются периодические решения для параметров матрицы Твисса  $\beta_{H,V}$ ,  $\alpha_{H,V}$  и дисперсионной функции  $D_{H,V}$  горизонтального ( $H$ ) и вертикального ( $V$ ) движения, а также частоты бетатронных колебаний  $Q_{H,V}$ . Для их определения находятся зависимости элементов матрицы перехода

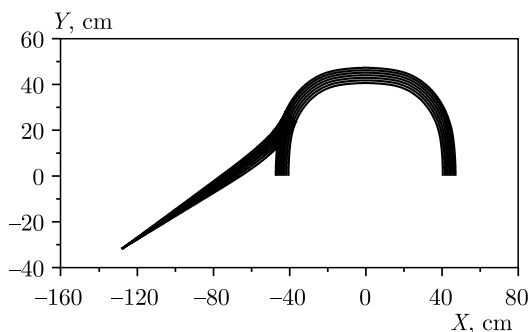


Рис. 3. Замкнутые и выводные орбиты циклотрона TR-24 при  $18 \leq W_{ex} \leq 24$  МэВ

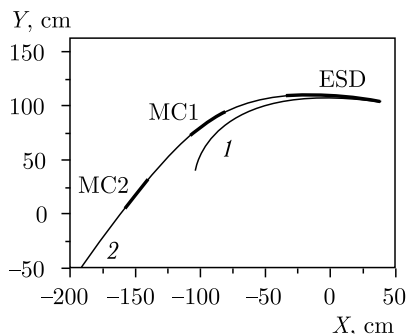


Рис. 4. Замкнутая и выводная орбиты ионов  $^{209}\text{Bi}^{38+}$  в циклотроне ДЦ-140

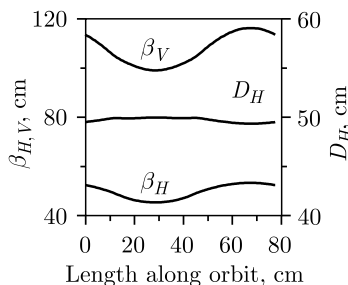


Рис. 5.  $\beta$ - и дисперсионная  $D_H$ -функции циклотрона TR-24 при  $W_{ex} = 24$  МэВ

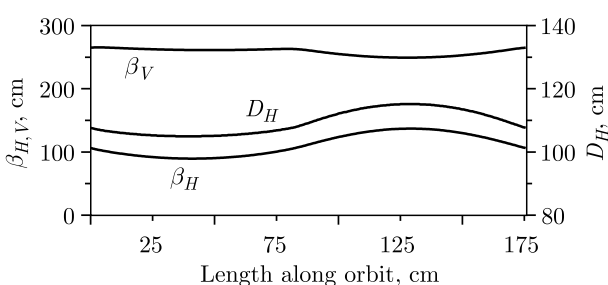


Рис. 6.  $\beta$ - и дисперсионная  $D_H$ -функции в циклотроне ДЦ-140, ионы  $^{209}\text{Bi}^{38+}$

для горизонтального и вертикального движения от длины  $s$  вдоль орбиты. Начальная точка орбиты соответствует положению перезарядной фольги или входу в электростатический дефлектор. Элементы матриц перехода, соответствующих полному обороту, определяют частоты бетатронных колебаний и начальные значения для периодических решений параметров Твисса и дисперсионной функции. Периодические решения для бетатронных  $\beta_{H,V}$  и горизонтальной дисперсионной функций  $D_H$  показаны на рис. 5, 6. Вертикальная дисперсионная функция  $D_V = 0$  в рассмотренных случаях.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА ИОНОВ

Распределение пучка ионов на перезарядной фольге или на входе в электростатический дефлектор находится методом крупных частиц. Оно зависит от функции распределения ускоренных частиц перед выводным устройством, а также от количества оборотов  $N_t$ , необходимых для вывода 100 % частиц, принадлежащих одному обороту и находящихся на азимуте  $\Phi_{ex}$  выводного устройства. Это число определяется отношением горизонтального размера пучка  $a_H$  и заброса за один оборот центра масс  $d$  на орбите вывода  $N_t = [a_H/d]$ .

Координаты макрочастиц, соответствующие ускоренному пучку с энергией вывода, разыгрываются независимо в каждой из двух фазовых плоскостей — горизонтальной  $(x, x')$  и вертикальной  $(y, y')$ . При этом частицы распределены равномерно по фазам

горизонтальных  $\mu_H$  и вертикальных  $\mu_V$  бетатронных колебаний, а распределение по амплитудам соответствует гауссовому, обрезанному при  $|x| \geq \sigma$ . Фазы ВЧ-поля  $\Phi_{RF}$  распределены равномерно на интервале  $|\Phi_{RF}| \leq \Delta\Phi_{RF}$ . Отклонение импульса иона от равновесного:  $\Delta p/p = 0,5(\cos \Phi_{RF} - 1)$ . С помощью линейного преобразования координат частиц в пятимерном фазовом пространстве  $(x, x', y, y', \Delta p/p)$  достигается совпадение моментов второго порядка распределения ионов с моментами, вычисленными в соответствии с параметрами замкнутой орбиты.

В обоих рассмотренных случаях  $N_t = 3$ . Центр масс ускоренного пучка смещен на величину  $2d$  в сторону центра циклотрона от радиуса  $R_{ex}$ . Здесь и в дальнейшем  $(R_{ex}, \Phi_{ex})$  — координаты точки на замкнутой орбите, соответствующей энергии  $W_{ex}$ . Энергия ускоренного пучка равна  $W_{ex} - 2\Delta W$ , где  $\Delta W$  — увеличение энергии частицы на одном обороте. Граница перезарядной фольги или септум электростатического дефлектора расположены на радиусе  $R_b = R_{ex} - d/2$ .

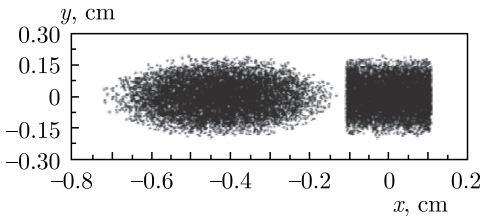


Рис. 7. Плоскость  $(x, y)$ . Циклотрон TR-24. Ускоренный пучок — слева; выведенный — справа

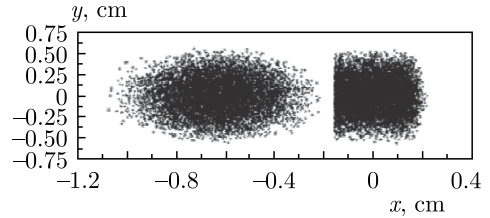


Рис. 8. Плоскость  $(x, y)$ . Циклотрон ДЦ-140. Ускоренный пучок — слева; выведенный — справа

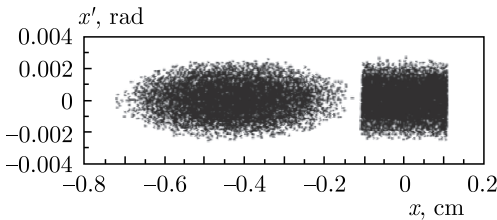


Рис. 9. Плоскость  $(x, x')$ . Циклотрон TR-24. Ускоренный пучок — слева; выведенный — справа

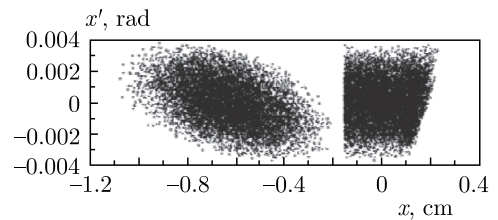


Рис. 10. Плоскость  $(x, x')$ . Циклотрон ДЦ-140. Ускоренный пучок — слева; выведенный — справа

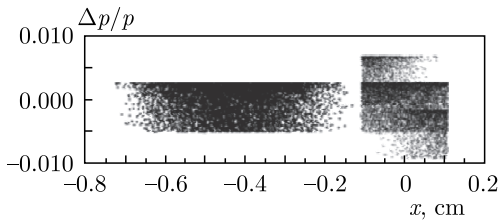


Рис. 11. Плоскость  $(x, \Delta p/p)$ . Циклотрон TR-24. Ускоренный пучок — слева; выведенный — справа

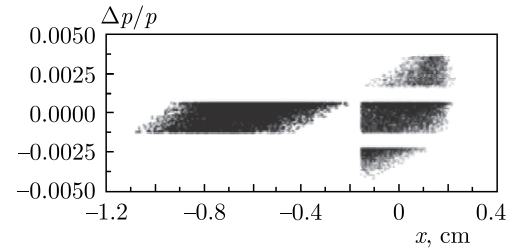


Рис. 12. Плоскость  $(x, \Delta p/p)$ . Циклотрон ДЦ-140. Ускоренный пучок — слева; выведенный — справа

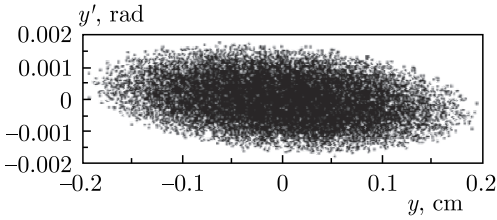


Рис. 13. Плоскость  $(y, y')$ . Циклотрон TR-24

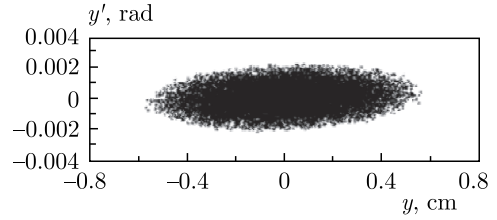


Рис. 14. Плоскость  $(y, y')$ . Циклотрон ДЦ-140

В процессе моделирования вывода фазовые координаты каждой частицы преобразовывались с помощью матрицы перехода для каждого из  $N_t$  оборотов. Частицы, имеющие радиус  $R > R_b$ , накапливались и не участвовали в вычислении вывода следующего оборота. Распределения частиц в различных фазовых плоскостях на азимуте вывода  $\Phi_{ex}$  показаны на рис. 7–12. Точка  $x = 0$  соответствует радиусу  $R = R_{ex}$ .

При расчете вывода из циклотрона TR-24  $\Delta\Phi_{RF} = 10^\circ$ , и  $\Delta\Phi_{RF} = 5^\circ$  при расчете для ДЦ-140.

На фазовой плоскости  $(x, \Delta p/p)$  в распределении выведенного пучка можно видеть три группы частиц с энергиями  $W_{ex} - \Delta W$ ,  $W_{ex}$ ,  $W_{ex} + \Delta W$ .

Распределения частиц на вертикальной плоскости  $(y, y')$  для ускоренного и выведенного пучка, показанные на рис. 13, 14, практически совпадают.

### ТРАНСПОРТИРОВКА ПУЧКА ПО ОРБИТЕ ВЫВОДА

Моделирование транспортировки пучка вдоль выводной орбиты проходит с помощью найденных зависимостей элементов матрицы перехода для горизонтального и вертикального движения от продольной длины  $s$ . При расчете транспортировки частиц на выводной орбите циклотрона ДЦ-140 проводился подбор градиентов  $G_{MC1,2}$  в магнитных каналах MC1, 2. Оптимальные величины градиентов:  $G_{MC1} = -12$  Тл/м и  $G_{MC2} = -9$  Тл/м. На рис. 15, 16 показано изменение вдоль орбиты вывода бетатронных функций  $\beta_{H,V}$  и дисперсионной функции  $D_H$ .

Горизонтальная ( $H$ ) и вертикальная ( $V$ ) огибающие пучка частиц на орбите вывода показаны на рис. 17, 18.

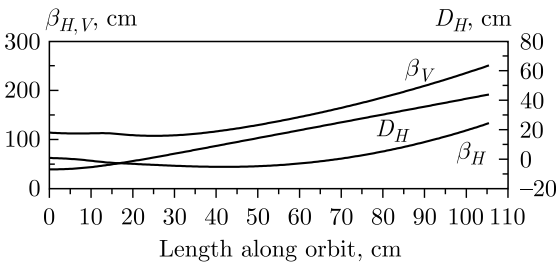


Рис. 15. Бетатронные функции  $\beta_{H,V}$  и дисперсионная функция  $D_H$ . Циклотрон TR-24

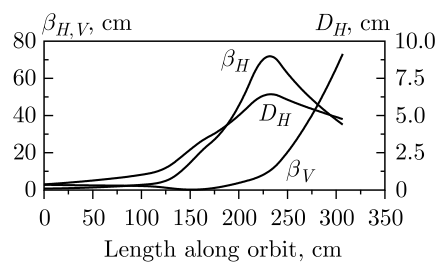


Рис. 16. Бетатронные функции  $\beta_{H,V}$  и дисперсионная функция  $D_H$ . Циклотрон ДЦ-140

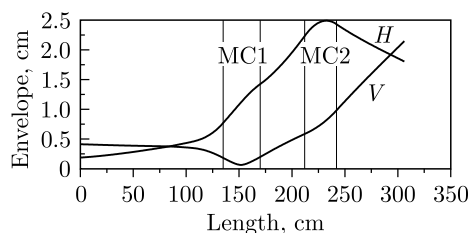
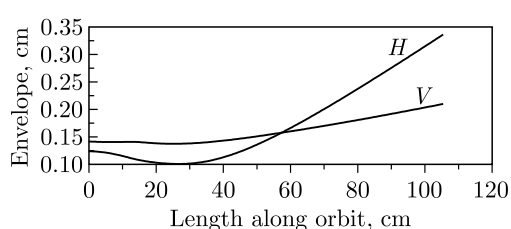


Рис. 17. Огибающие пучка (циклотрон TR-24)

Рис. 18. Огибающие пучка (циклотрон ДЦ-140)

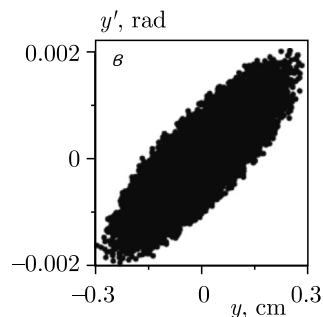
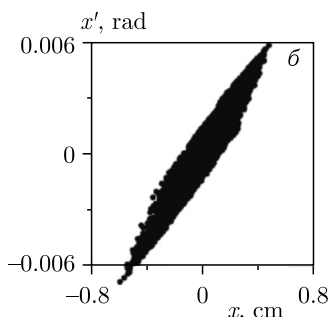
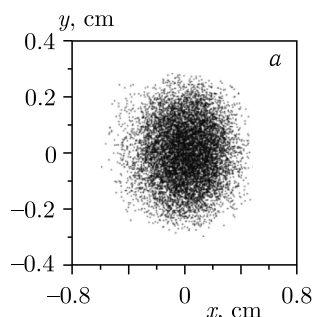


Рис. 19. а) Плоскость  $(x, y)$ . Циклотрон TR-24. б) Плоскость  $(x, x')$ . Циклотрон TR-24. в) Плоскость  $(y, y')$ . Циклотрон TR-24

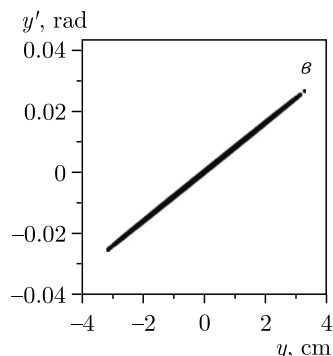
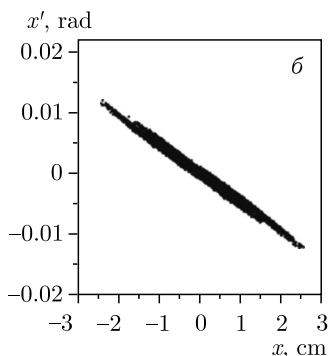
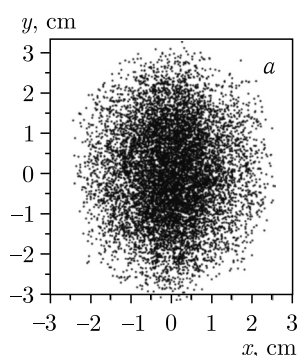


Рис. 20. а) Плоскость  $(x, y)$ . Циклотрон ДЦ-140. б) Плоскость  $(x, x')$ . Циклотрон ДЦ-140. в) Плоскость  $(y, y')$ . Циклотрон ДЦ-140

Распределения частиц на различных фазовых плоскостях в конечной точке орбиты вывода циклотрона TR-24 показаны на рис. 19.

Распределения частиц на различных фазовых плоскостях в конечной точке орбиты вывода циклотрона ДЦ-140 показаны на рис. 20.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advanced Cyclotron Systems Inc. <http://www.advancedcyclotron.com/cyclotron-solutions/tr24/>.
2. Gikal B. N. Dubna Cyclotrons — Status and Plans // Proc. of the 17th Conf. on Cycl. and Their Appl., Tokyo, Oct. 2004. P. 100–104; <http://www.jacow.org>.