

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.633.5

КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ЦИКЛОТРОНА У400Р ДЛЯ  
НОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗАЛА<sup>1</sup>

© 2024 г. В. И. Лисов<sup>а,\*</sup>, В. И. Басс<sup>а</sup>, И. А. Иваненко<sup>а</sup>, И. В. Калагин<sup>а</sup>,  
Н. Ю. Казаринов<sup>а</sup>, А. С. Забанов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Объединенный институт ядерных исследований

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

\*e-mail: lisov@jinr.ru

Поступила в редакцию 26.12.2024 г.

После доработки 01.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Представлена новая схема линий транспортировки ионов от циклотрона У400Р в новый экспериментальный зал. В состав каналов входит коммутирующий магнит с индукцией переменного магнитного поля до 1.3 Тл, который позволяет работать в трех направлениях, обеспечивая транспортировку ионов по каналам к трем экспериментальным установкам. Фокусировка пучка в каналах обеспечивается набором квадрупольных линз, имеющих градиенты до 7.7 Тл/м.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Основная деятельность Лаборатории ядерных реакций им. Флерова Объединенного института ядерных исследований связана с фундаментальной наукой. В настоящее время в лаборатории продолжают работы по реконструкции циклотрона У400, обеспечивающего исследования по трем основным направлениям физики тяжелых ионов: синтез тяжелых и экзотических ядер, исследования ядерных реакций и исследования взаимодействия вещества с тяжелыми ионами. У400Р станет результатом реконструкции циклотрона У400 [1].

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

Изохронный циклотрон предназначен для получения ускоренных пучков ионов от углерода до урана с энергиями от 0.8 МэВ/нуклон до 27 МэВ/нуклон (рис. 1) [2].

Эффективность использования данного ускорителя во многом будет определяться качеством системы транспортировки выведенных пучков. Достаточно разветвленная система каналов позволяет проводить многоплановые физические и прикладные исследования. В рамках работ по реконструкции ускорительного комплекса предусмотрено здание нового экспериментального зала (НЭЗ), связанного со зданием ускорителя (зд.131) через новый участок проводки ионопровода (УПИ). Для данного ускорительного комплекса создается система транспортировки из трех каналов разводки пучков (рис. 2).

**Рис. 1.** Рабочая диаграмма У400Р

В данной работе представлены результаты компоновки каналов и расчеты транспортировки пучка  $^{49}\text{Ca}^{7+}$  с энергией  $W = 11.085$  МэВ/нукл из циклотрона U400R в каналах нового экспериментального зала. Расчеты трассировки выведенного ионного пучка проводились с помощью программы TRANSPORT [3] для параметров ионного пучка, приведенных в табл. 1.

**Таблица 1.** Начальные параметры пучка

Ион	$W$ , МэВ/нукл	$\alpha_x$	$\beta_x$ см/мрад	$\alpha_y$	$\beta_y$ см/мрад	$\varepsilon_{rmsx}$ , $\pi \cdot$ см мрад	$\varepsilon_{rmsy}$ $\pi \cdot$ см мрад	$D_x$ см	$D_x'$	$\Delta p/p$ $2\sigma$ , %	$\Delta E/E$ $2\sigma$ , %
$^{48}\text{Ca}^{7+}$	11.0853	0.599	1.589	3.058	0.363	0.064	0.114	428.52	0.695	0.155	0.31

*Примечание.* В табл. 1 использованы следующие обозначения:  $\alpha_x, \beta_x, \alpha_y, \beta_y$  – параметры Твисса,  $\varepsilon_{rmsx}, \varepsilon_{rmsy}$  – значения горизонтального и вертикального среднеквадратичных эмиттансов,  $D_x$  и  $D_x'$  – начальные значения горизонтальной дисперсионной функции и ее производной. Значения вертикальной дисперсионной функции  $D_y$  и ее производной  $D_y'$  близки к нулю. Максимальная жесткость  $B\rho$  выведенного пучка  $^{48}\text{Ca}^{7+}$  составляет 3.31 Т·м.

**Рис.2.** Компоновка каналов транспортировки от циклотрона У400Р к физустановкам в НЭЗ через УПИ

## 2. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В НЭЗ В КАНАЛЕ №1

Общая длина канала равно 65.787 м. Оптические элементы канала имеют следующие параметры.

1. Дуплеты квадрупольных линз  $Q_1 - Q_{25}$  и квадрупольная линза  $Q_{d1}$ : эффективная длина  $l_{eff} = 35$  см, апертура 110 мм, максимальный градиент  $G_{max} = 600$  Гс/см, расстояние между центрами квадрупольных линз в дуплете 58 см.

2. Поворотный магнит  $TM_2$ : угол поворота  $19.35^\circ$  (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота  $\rho_0 = 2.16$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 0$ .

3. Поворотные магниты  $TM_3$  и  $TM_4$ : угол поворота  $7.5^\circ$  (поворот в вертикальной плоскости, магнит  $TM_3$  поворачивает вверх, магнит  $TM_4$  поворачивает вниз), радиус поворота  $\rho_0 = 3.1$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 0$ .

4. Поворотный магнит  $TM_5$ : угол поворота  $40^\circ$  (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота  $\rho_0 = 2.558$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 20^\circ$ .

Схема компоновки канала №1 в НЭЗ представлена на рис. 3.

**Рис. 3.** Схема компоновки канала № 1 НЭЗ

На рис. 4, 5 представлены графики огибающих и дисперсионных функций при транспортировке пучка  $^{48}\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 1.

**Рис. 4.** График огибающих пучка  $^{48}\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 1

**Рис. 5.** График дисперсионных функций пучка  $^{48}\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 1

### 3. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В НЭЗ В КАНАЛЕ №2

Общая длина канала равна 53.316 м. Оптические элементы канала имеют следующие параметры.

1. Дуплеты квадрупольных линз  $Q_1 - Q_{18}$ ,  $Q_{d2} - Q_{d3}$  и квадрупольная линза  $Q_{d1}$ : эффективная длина  $l_{eff} = 35$  см, апертура 110 мм, максимальный градиент  $G_{max} = 600$  Гс/см, расстояние между центрами квадрупольных линз в дуплете 58 см.

2. Поворотный магнит  $TM_2$ : угол поворота  $19.35^\circ$  (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота  $\rho_0 = 2.16$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 0$ .

3. Поворотные магниты  $TM_3$  и  $TM_4$ : угол поворота  $7.5^\circ$  (поворот в вертикальной плоскости, магнит  $TM_3$  поворачивает вверх, магнит  $TM_4$  поворачивает вниз), радиус поворота  $\rho_0 = 3.1$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 0$ .

Схема компоновки канала № 2 в НЭЗ приведена на рис. 6.

**Рис. 6.** Схема компоновки канала № 2 НЭЗ

На рис. 7, 8 представлены графики огибающих и дисперсионных функций при транспортировке пучков в канале № 2 в НЭЗ.

**Рис. 7.** График огибающих пучка  $48Ca^{7+}$  в НЭЗ в канале № 2

**Рис. 8.** График дисперсионных функций пучка  $48Ca^{7+}$  в НЭЗ в канале № 2

#### 4. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА В НЭЗ В КАНАЛЕ №3

Общая длина канала равна 56.946 м. Оптические элементы канала имеют следующие параметры.

1. Дуплеты квадрупольных линз  $Q_1 - Q_{20}$  и квадрупольная линза  $Q_{d1}$ : эффективная длина  $l_{eff} = 35$  см, апертура 110 мм, максимальный градиент  $G_{max} = 600$  Гс/см, расстояние между центрами квадрупольных линз в дуплете 58 см.

2. Поворотный магнит  $TM_2$ : угол поворота  $19.35^\circ$  (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота  $\rho_0 = 2.16$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 0$ .

3. Поворотные магниты  $TM_3$  и  $TM_4$ : угол поворота  $7.5^\circ$  (поворот в вертикальной плоскости, магнит  $TM_3$  поворачивает вверх, магнит  $TM_4$  поворачивает вниз), радиус поворота  $\rho_0 = 3.1$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 0$ .

4. Поворотный магнит  $TM_5$ : угол поворота  $40^\circ$  (поворот в горизонтальной плоскости, направление поворота не совпадает с направлением вращения пучка в циклотроне), радиус поворота  $\rho_0 = 2.558$  м, углы скоса  $\varepsilon_{in} = 0$ ,  $\varepsilon_{out} = 20$ .

Схема компоновки канала № 3 в НЭЗ показана на рис. 9.

**Рис.9.** Схема компоновки канала № 3 НЭЗ

На рис. 10, 11 представлены графики огибающих и дисперсионных функций при транспортировке пучка в НЭЗ в канале № 3.

**Рис. 10.** График огибающих пучка  $48Ca^{7+}$  в НЭЗ в канале № 3

**Рис. 11.** График дисперсионных функций пучка  $^{48}\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 3

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам расчета транспортировка ионов  $^{48}\text{Ca}^{7+}$  во всех каналах происходит без потерь. Огибающие по всей длине канала не превышают 80 % апертуры ионопровода. На мишени получены требуемые размеры пучка диаметром равным 1 см ( $4\sigma$ ) и нулевые значения дисперсионных функций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalagin I.V., Gulbekian G.G., Dmitriev S.N.et.al. // Proc. of 26<sup>th</sup> Russian Particle Accelerator Conference, Protvino, Russia. 2018. P. 60. JACoW-CYCLOTRONS2019-FRB02*
2. *Kalagin I.V., Gulbekian G.G., Dmitriev S.N.et.al. // Proc. of 14th Conf. on Heavy Ion Accelerator Technology. China: Lanzhou. 2018. P. 23. doi:10.18429/JACoW-HIAT2018-MOOXA01*
3. *PSI Graphic Transport Framework by U. Rohrer based on a CERN-SLAC-FERMILAB version by Brown K.L, Carey D.C., Iselin Ch. et al. [http://aea.web.psi.ch/Urs\\_Rohrer/MyWeb/trans.htm](http://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/trans.htm)*

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Рабочая диаграмма У400Р.

**Рис.2.** Компоновка каналов транспортировки от циклотрона У400Р к физустановкам в НЭЗ через УПИ.

**Рис. 3.** Схема компоновки канала № 1 НЭЗ.

**Рис. 4.** График огибающих пучка  $48\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 1.

**Рис. 5.** График дисперсионных функций пучка  $48\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 1.

**Рис. 6.** Схема компоновки канала № 2 НЭЗ.

**Рис. 7.** График огибающих пучка  $48\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 2.

**Рис. 8.** График дисперсионных функций пучка  $48\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 2.

**Рис.9.** Схема компоновки канала № 3 НЭЗ.

**Рис. 10.** График огибающих пучка  $48\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 3.

**Рис. 11.** График дисперсионных функций пучка  $48\text{Ca}^{7+}$  в НЭЗ в канале № 3.

Extraction Radius 1.8 m, Generator Frequency 6.5 - 12.5 MHz

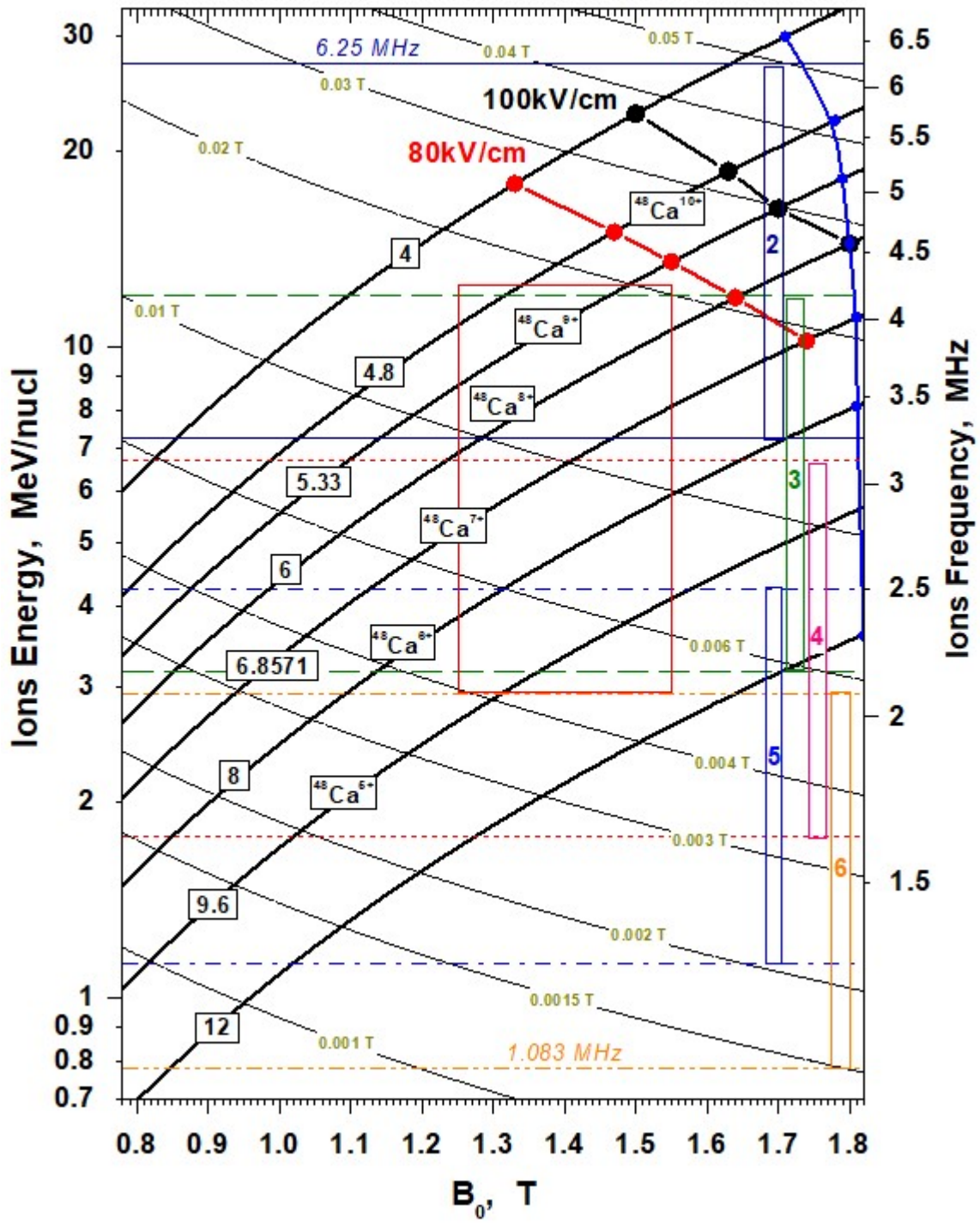


Рис.1

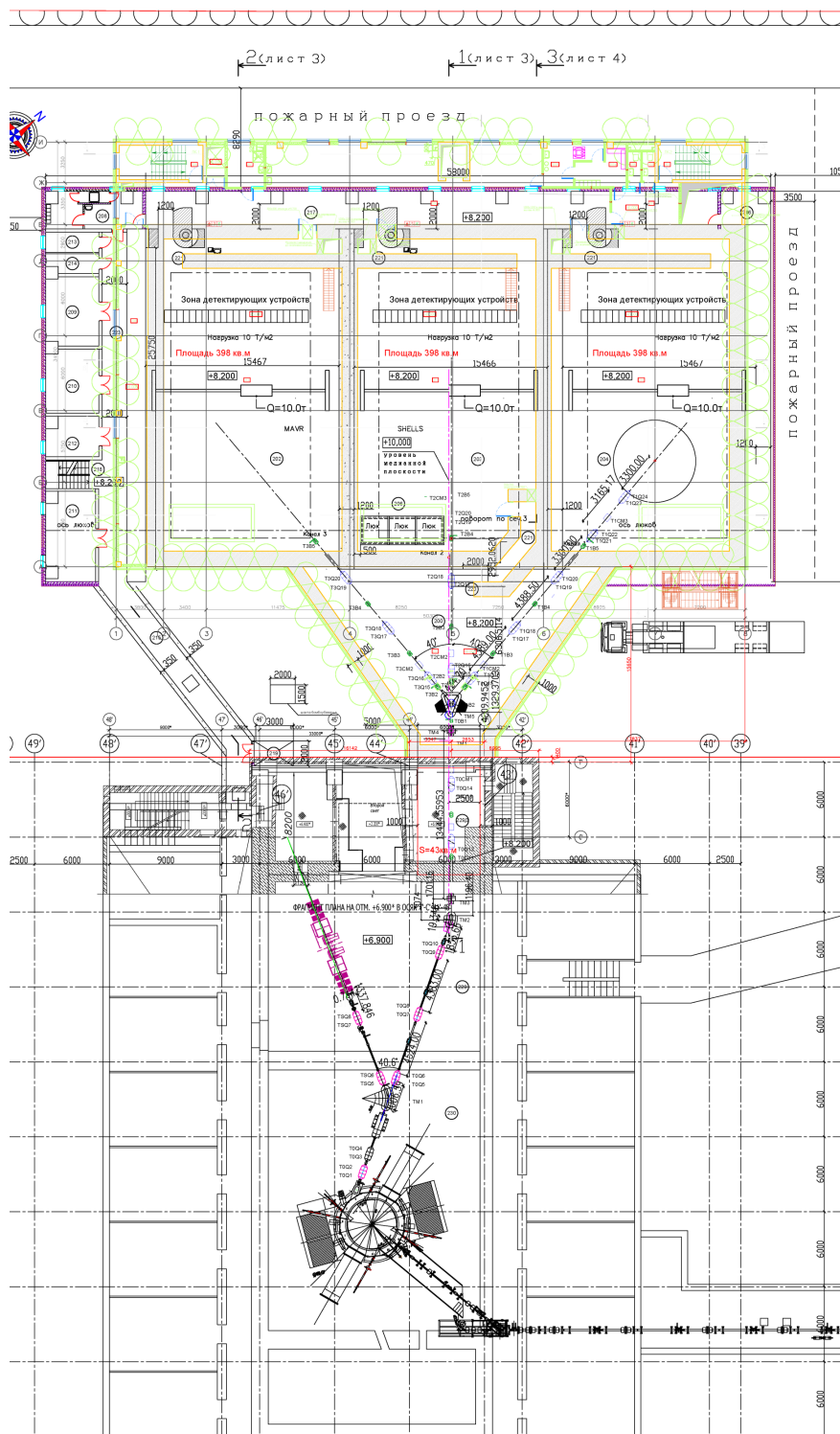


Рис. 2

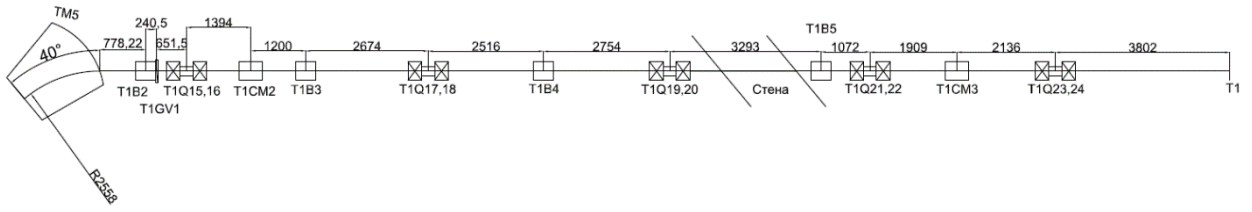


Рис. 3

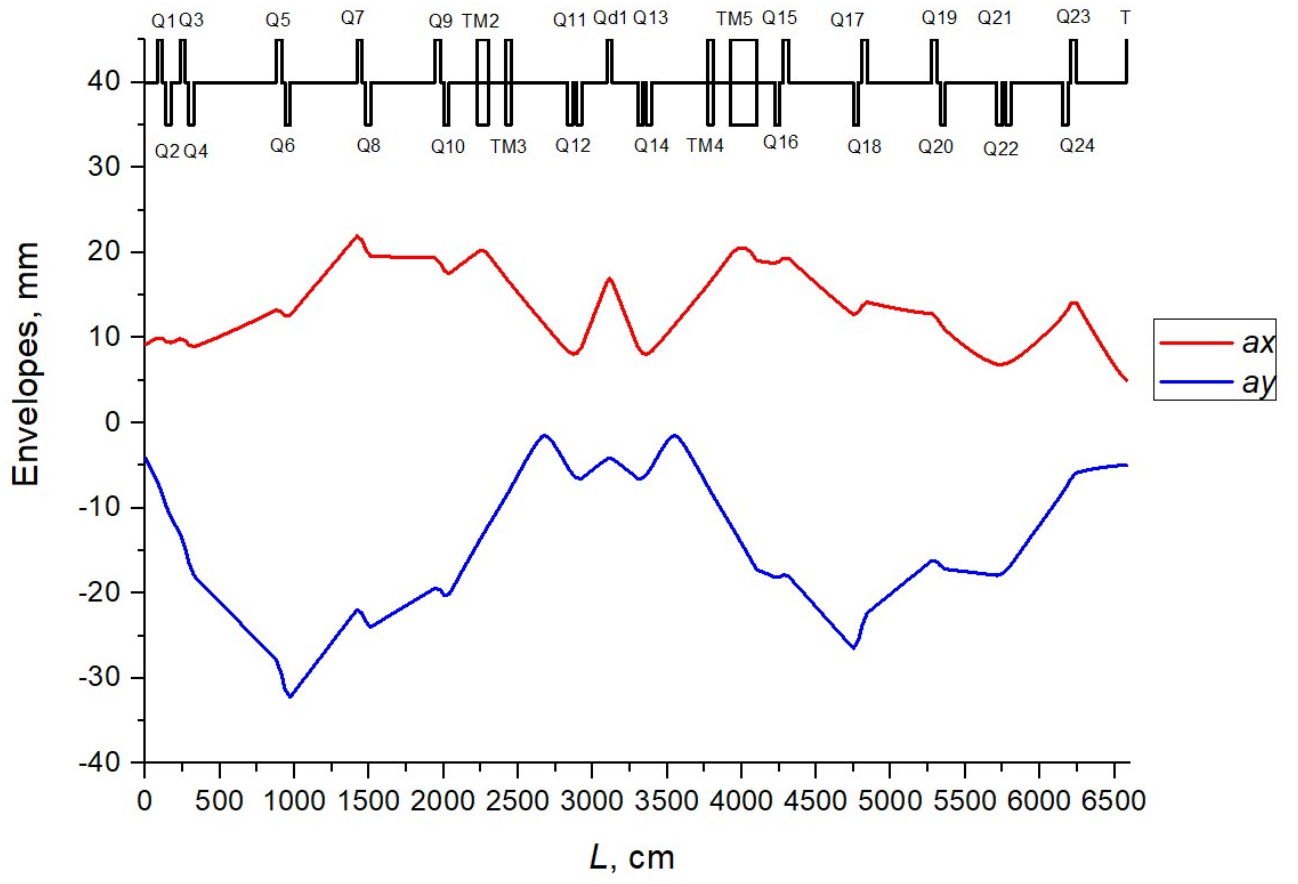


Рис. 4

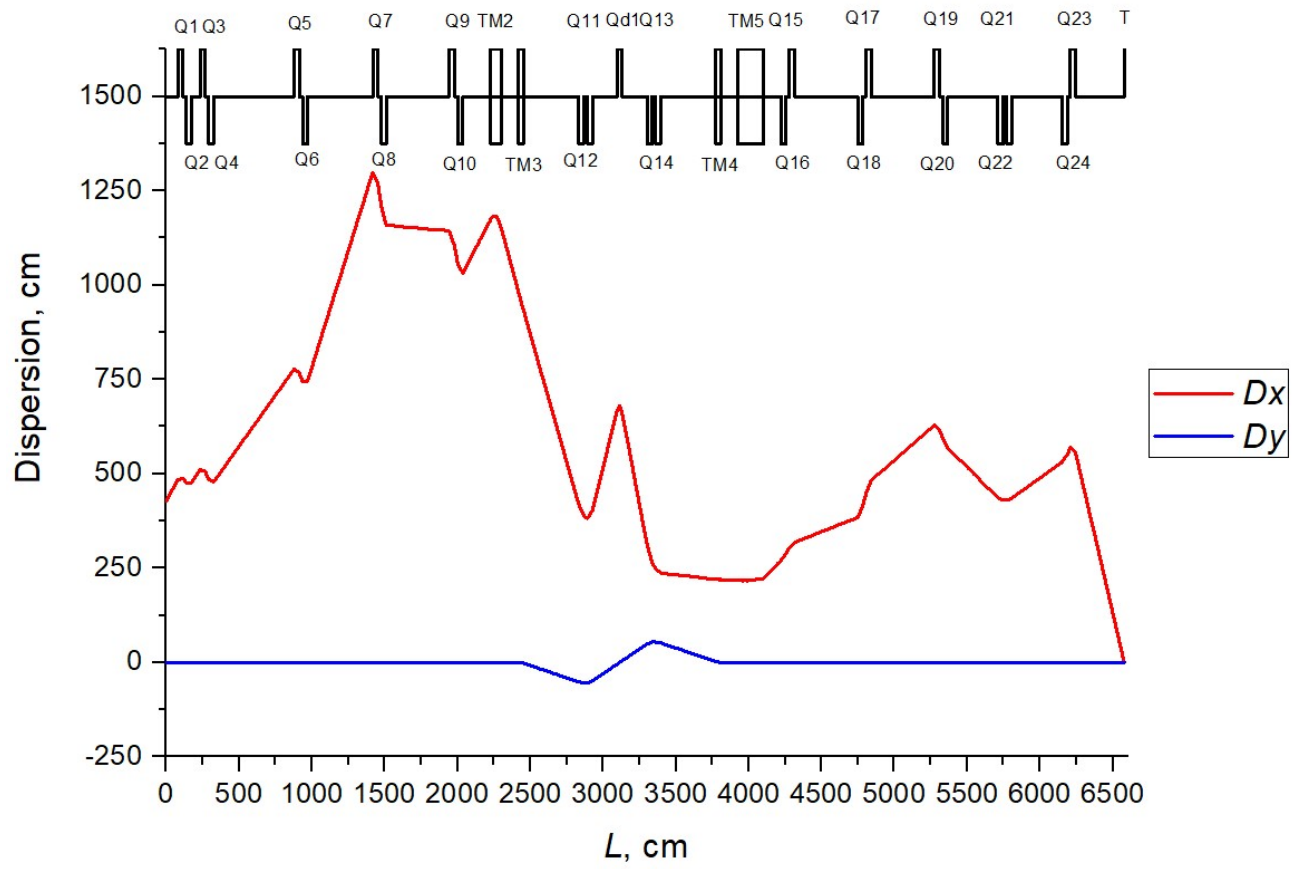


Рис. 5

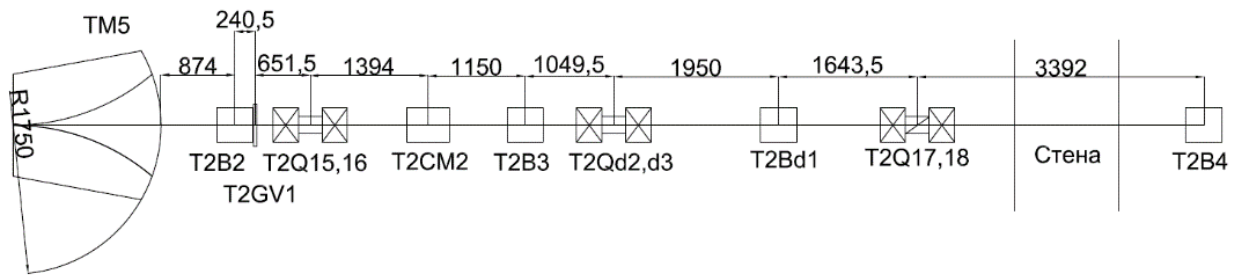


Рис. 6

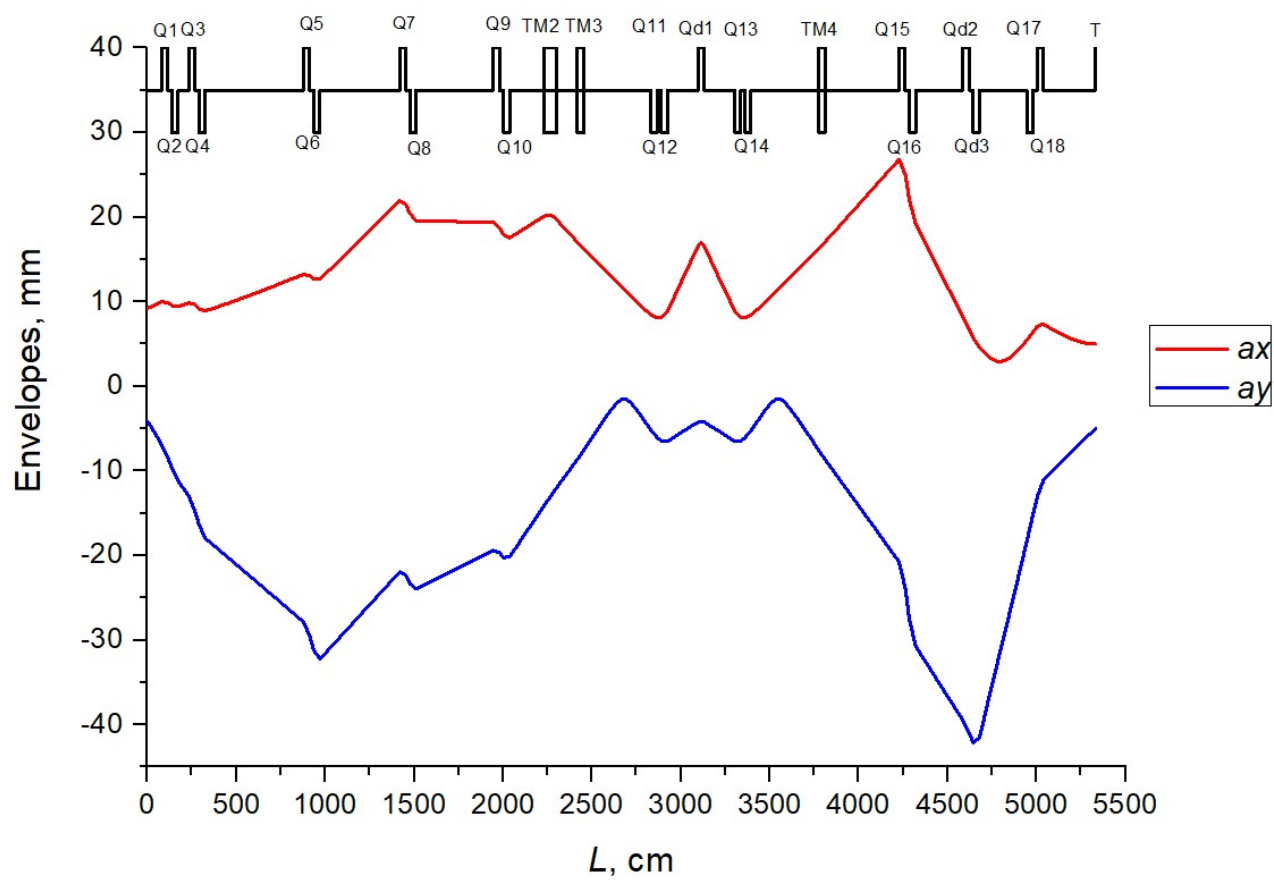


Рис.7

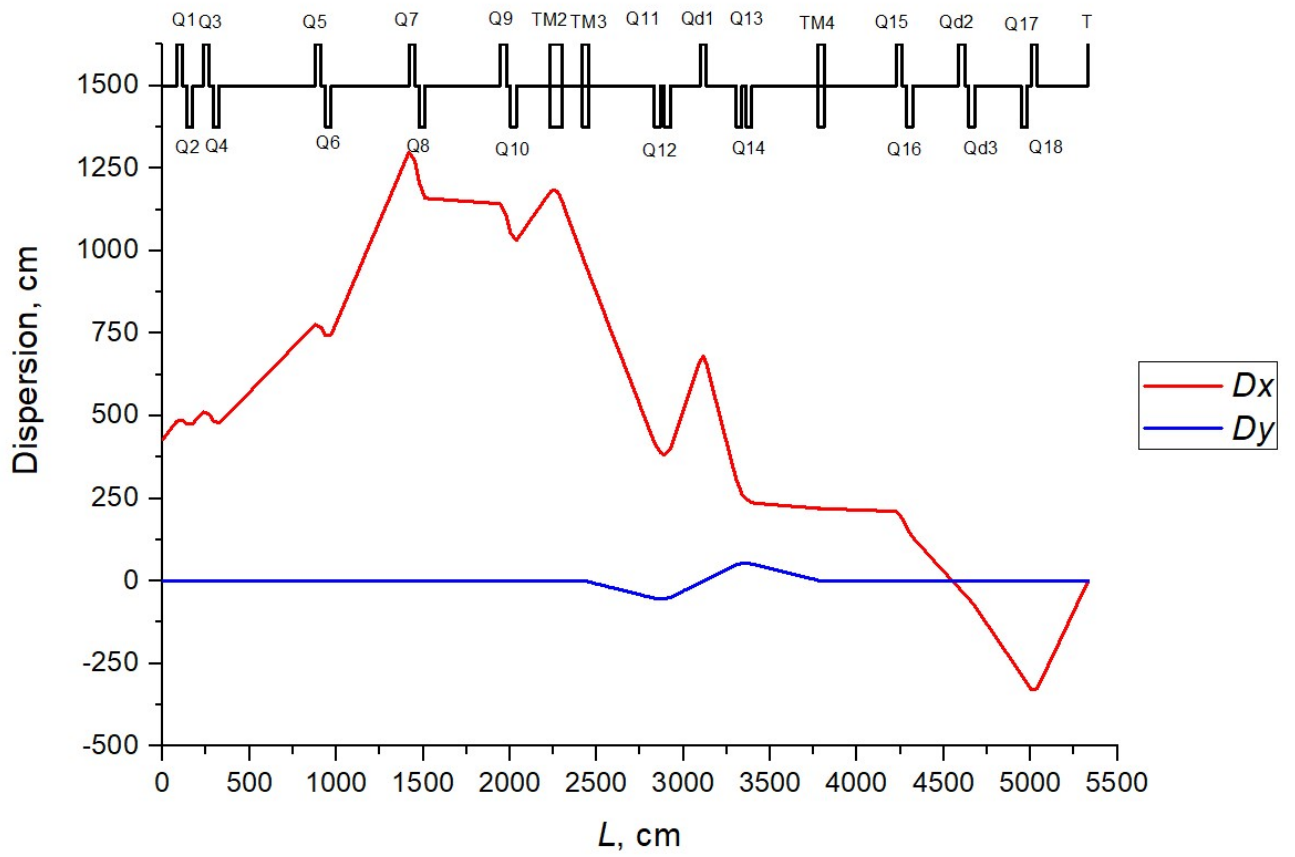


Рис. 8

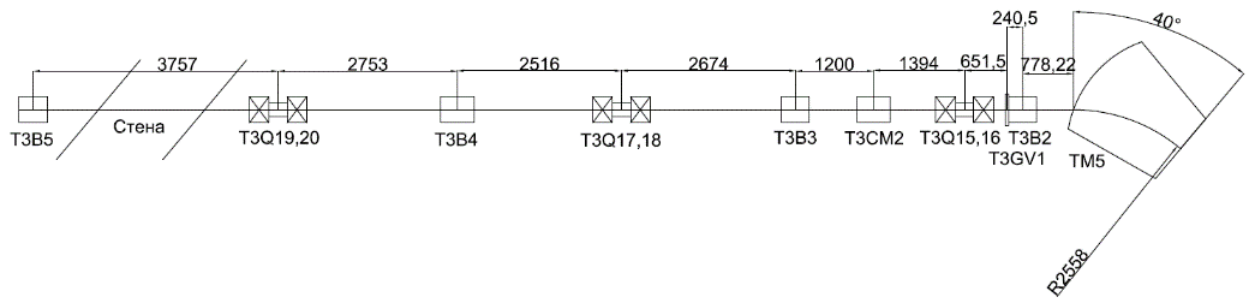


Рис. 9

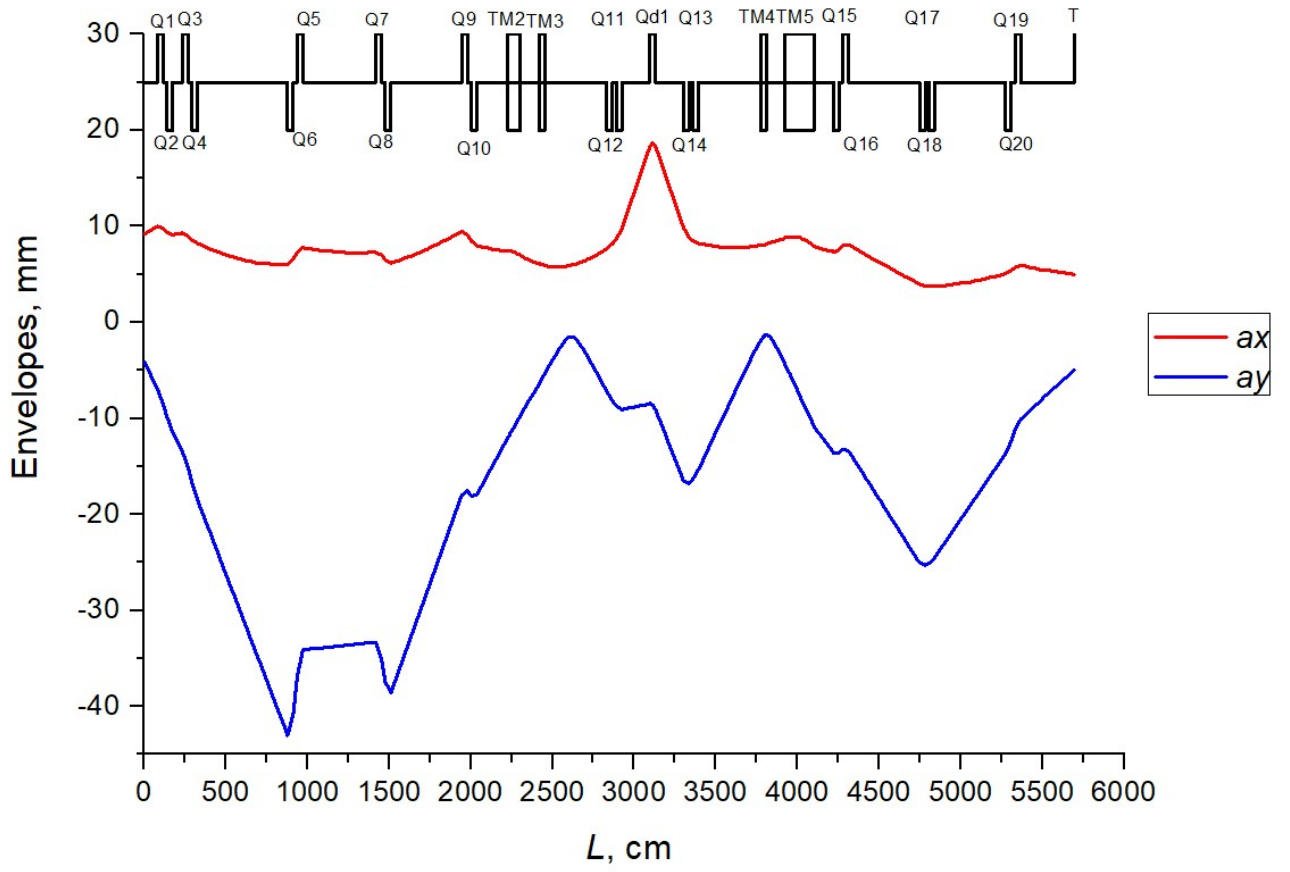


Рис. 10

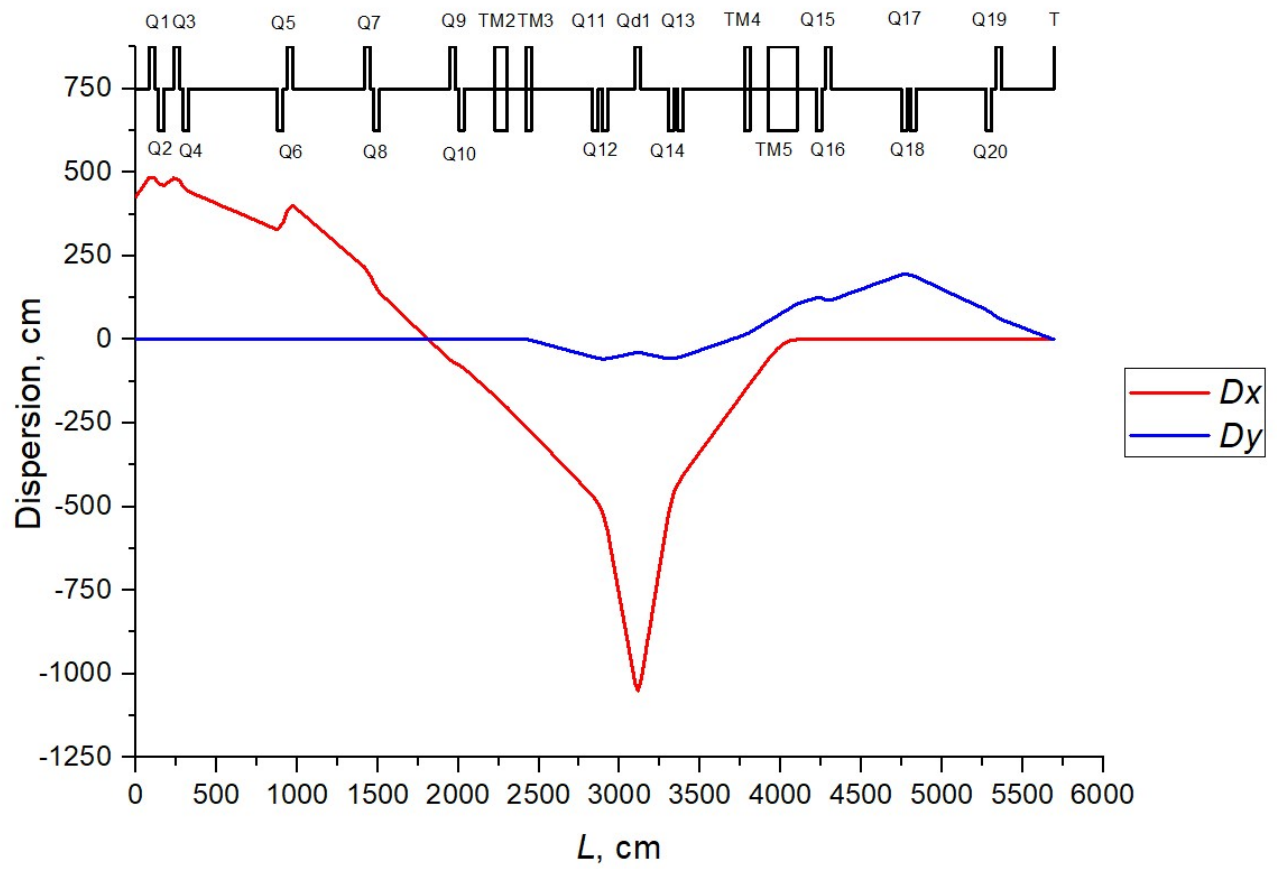


Рис. 11

Для связи с авторами:

Лисов Владислав Игоревич

Е-mail: [lisov@jinr.ru](mailto:lisov@jinr.ru)

Тел: 8-916-988-68-61 (моб.)

Для переводчика:

**Beam lines for New Experimental Hall of U400R cyclotrons**

V. I. Lisov<sup>a, \*</sup>, V. I. Bass<sup>a</sup>, I. A. Ivanenko<sup>a</sup>, I. V. Kalagin<sup>a</sup>, N. Yu. Kazarinov<sup>a</sup>, A. S. Zabanov<sup>a</sup>

*<sup>a</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia*

*\*e-mail: [lisov@jinr.ru](mailto:lisov@jinr.ru)*

**Abstract** – The main activities of Flerov the Laboratory of Nuclear Reactions, following its name - are related to fundamental science. For the moment the Laboratory continues works under reconstruction of the cyclotron U400 which provides research for three main directions of heavy ion physics: synthesis of heavy and exotic nuclei, studies of nuclear reactions and studies of interaction of matter with heavy ions. U400R will be the result of reconstruction of the U400 cyclotron [1].

The design of beam lines for ion transportation from the cyclotron U400R to the new experimental hall is presented. The beam lines include commutating magnet with variable magnetic field induction up to 1.3 T that gives one the possibility to bend ion beams in three directions providing ion transportation through the beam lines to three experimental setups. The beam focusing in the beam lines is provided by set of quadrupole lenses having the gradients up to 7.7 T/m.