

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК621.384

СОЗДАНИЕ КАНАЛОВ ПУЧКОВ ИОНОВ УГЛЕРОДА ДЛЯ  
ПРОВЕДЕНИЯ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ И ПРЕДКЛИНИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70<sup>1</sup>

© 2024 г. В. И. Гаркуша<sup>а,\*</sup>, С. В. Иванов<sup>а</sup>, В. А. Калинин<sup>а</sup>, А. В. Максимов<sup>а</sup>,  
А. М. Маркин<sup>а</sup>, Ф. Н. Новоскольцев<sup>а</sup>, В. А. Пикалов<sup>а</sup>, А. П. Солдатов<sup>а</sup>,  
Р. Ю. Синюков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”  
Россия, 142280, Протвино, Московская обл., ул. Победы, 1*

*\*e-mail: Valeriy.Garkusha@ihep.ru*

Поступила в редакцию 29.01.2024 г.

После доработки 28.02.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

Представлена магнитооптическая схема канала транспортировки пучков ионов углерода  $^{12}\text{C}^{+6}$  в зону радиобиологических исследований. Приведены результаты замедления ионов углерода в ускорителе У-70 от 455 до 200 МэВ/нуклон и вывода пучка из У-70. Рассмотрена схема формирования равномерного дозового поля с помощью вертикального и горизонтального вобблер-магнитов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире для лечения онкологических заболеваний широко применяются методы лучевой терапии. Однако накопленный клинический опыт свидетельствует о существовании определенных типов опухолей, резистентных к воздействию электронных и гамма-лучей. Для эффективной терапии таких опухолей наиболее подходящим инструментом являются ускоренные ионы углерода.

---

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

В течение длительного времени в ИФВЭ проводятся исследования по использованию пучков ионов углерода  $^{12}\text{C}^{+6}$ , выведенных из ускорителя У-70. Для проведения прикладных радиобиологических исследований функционирует временный радиобиологический стенд (РБС), на котором работают специалисты из Пущино и Обнинска. Транспортировка пучка в зону РБС осуществляется по каналу №25.

Канал №25 формирует пучок ионов с равномерным дозовым полем больших поперечных размеров. Для более эффективного лечения онкологических больных предпочтительнее использование узкого пучка (pencil-beam), что может быть реализовано на ускорительном комплексе ИФВЭ в новом канале №26.

ИФВЭ является единственным научным центром в России, использующим пучки ионов углерода для радиобиологических и медицинских исследований. Даже в мировом масштабе число таких центров крайне ограничено, в то время как потребность в них неуклонно растет.

## 2. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СХЕМА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ ИОНОВ УГЛЕРОДА

Магнитооптический канал транспортировки пучка ионов углерода в радиобиологическую зону состоит из:

- группы отклоняющих магнитов  $\text{CM}_{34}$ ,  $\text{OM}_1$ ,  $\text{OM}_2$ ,  $\text{OM}_3$ ;
- квартета квадрупольных линз  $\text{Q}_1$ - $\text{Q}_4$  (диаметр апертуры 75 мм);
- триплета квадрупольных линз  $\text{Q}_5$ - $\text{Q}_7$  (диаметр апертуры 100 мм);
- вертикального и горизонтального вобблер-магнитов.

На рис.1 представлен канал транспортировки выведенного пучка. Территориально канал состоит из двух частей. В кольцевом зале У-70 после магнита  $\text{OM}_3$  размещены 4 квадрупольные линзы (квартет). Далее, за биологической защитой У-70 размещен триплет квадрупольных линз, вобблер-магниты системы формирования равномерного дозового поля. Зона радиобиологических исследований отделена от зоны канала бетонной стенкой толщиной 1 м.

**Рис.1.** Схема магнитооптического канала для вывода ионного пучка.

На расстоянии 6 м от последней линзы на входе в бетонную стенку установлен коллиматор, через 2.5 м от стенки находится изоцентр радиобиологической установки (центр поворотного стола). Расстояние от септум-магнита  $\text{CM}_{34}$  до изоцентра составляет примерно 34 м. Вакуум (порядка  $10^{-2}$  мм.рт.ст.) обеспечивается до последней квадрупольной линзы, на

последнем участке от линзы до изоцентра (длина около 9 м) пучок транспортируется по воздуху.

### 3. ЗАМЕДЛЕНИЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА В У-70

Пучок ионов углерода, предварительно ускоренный в линейном ускорителе И-100 до энергии 16.7 МэВ/нуклон, инжектируется в бустерный синхротрон, где происходит его дальнейшее ускорение до 455 МэВ/нуклон и затем сгусток ионов переводится из бустера в основной синхротрон У-70.

Для проведения радиобиологических исследований в широкой области энергий энергия ионного пучка может быть уменьшена до 200 МэВ/нуклон. Это достигается соответствующей процедурой замедления ионов углерода в синхротроне У-70 с обеспечением энергий 400, 350, 300, 250 и 200 МэВ/нуклон (активное замедление). Промежуточные значения энергий получаются с помощью дегрэйдера непосредственно в канале транспортировки (пассивное замедление). На рис.2 приведен пример активного замедления пучка до энергии 200 МэВ/нуклон.

**Рис. 2.** Замедление ионов углерода в У-70 до энергии 200 МэВ/нуклон:

Интенсивность ионного пучка при инжекции в У-70 составляет  $(3-6) \cdot 10^9$  ионов/цикл. Доля оставшегося пучка после замедления до 300 МэВ/н составляет около 80%, до 200 МэВ/н примерно 50–60%.

### 4. ВЫВОД ИОНОВ УГЛЕРОДА ИЗ У-70

Для вывода ионного пучка применяется классическая двухступенчатая схема вывода Пиччиони – Райта [1] (рис.3).

**Рис. 3.** Принципиальная схема вывода пучка из ускорителя У-70.

В соответствии с этой схемой в 28-м прямолинейном промежутке ускорителя У-70 установлена внутренняя мишень (ВМ). Используется набор из 6 мишеней из бериллия длиной от 4.51 до 1.37 мм для вывода ионного пучка в диапазоне энергий соответственно от 455 до 200 МэВ/нуклон.

Наведение пучка на мишень осуществляется посредством шумовой (стохастической) раскачки амплитуд горизонтальных бетатронных колебаний циркулирующего пучка [2]. В процессе наведения циркулирующего пучка на мишень частицы, попавшие в мишень, испытывают ионизационные потери энергии, причем для всех режимов вывода импульс частиц после прохождения через мишень уменьшается примерно на 0.7%. Вышедшие из

мишени частицы совершают бетатронные колебания относительно новой смещенной внутрь кольца равновесной орбиты. Через половину длины волны бетатронных колебаний далее по ходу пучка пространственное разделение между выводимой частью и циркулирующим пучком становится достаточным для размещения тонкой перегородки септум-магнита. В этом месте (начало 34-го прямолинейного промежутка) размещен септум-магнит СМ<sub>34</sub>.

## 5. ФОРМИРОВАНИЕ РАВНОМЕРНОГО ДОЗОВОГО ПОЛЯ

Для медицинского и радиобиологического применения пучков ионов углерода необходимо использовать специальные технологии, позволяющие формировать достаточно широкое и однородное поле облучения, покрывающее биологический объект должным образом как в поперечном, так и в продольном направлении. В нашем случае для формирования дозовых полей должной однородности применяется растровое сканирование широким пучком (диаметром 60–90 мм в зависимости от энергии пучка).

Сканирующая система состоит из горизонтального и вертикального вобблер-магнитов, источников питания к ним и контроллера управления. На рис.4 приведено фото вобблер-магнитов и стоек источников питания. Параметры вобблер-магнитов приведены в табл.1.

**Рис. 4.** Вобблер-магниты и стойки источников питания (справа).

Сканирующая система позволяет обеспечить зону облучения более 100×100 мм<sup>2</sup> с равномерностью не хуже 94–95%.

**Таблица 1.** Параметры вобблер-магнитов

Параметр	Значение
Длина, м	0.50
Апертура Н×V, мм (горизонтальный магнит)	110×75
Число витков Н×V	3×6
Максимальное поле, Тл	0.2
Скорость сканирования, мм/мс	20
Индуктивность, мкГн	430
Сопротивление обмотки, мОм	8

На рис.5 представлено дозовое распределение плотности ядер углерода в радиохромной дозиметрической пленке GafChromic EBТ3 [3,4] в центре пучка перед изоцентром в вертикальной полосе шириной 0.34 мм.

**Рис. 5.** Дозовое распределение в вертикальной плоскости перед изоцентром.

## 6. ПРОЕКТ РАЗВИТИЯ КАНАЛОВ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ИФВЭ

Дальнейшее развитие проводимых исследований, а также применение полученного углеродного пучка для целей ионной лучевой терапии связано с планами создания на ускорителе У-70 канала №26 и специализированной медицинской зоны.

Схема расположения канала №26 и медицинской зоны с двумя процедурными кабинетами в экспериментальном зале У-70 приведена на рис.6. Пучок может быть поочередно направлен в одну из двух процедурных кабин, причем для первой из них предусмотрена также подача пучка под углом  $30^\circ$  в вертикальной плоскости (на рис.6 этот участок канала изображен повернутым на  $90^\circ$ ).

**Рис. 6.** Схема расположения канала №26 и медицинской зоны в экспериментальном зале

При разработке магнитооптической системы канала был реализован модульно-функциональный принцип построения оптики канала с локальным подавлением дисперсии на каждом участке [5].

Начальный участок канала, находящийся в кольцевом зале У-70, включает в себя пять квадрупольных линз, две из которых являются общими с каналом №25, а также два отклоняющих магнита, отворачивающих пучок от направления канала №25 на угол  $30^\circ$ . В направлении канала №26 обеспечивается компенсация дисперсии, создаваемой выводными магнитами, и согласование параметров выведенного пучка с оптической системой последующих участков канала.

Для транспортировки пучка на горизонтальных участках канала используется периодическая система из квадрупольных линз с набегом фазы  $\pi/2$  на периоде длиной 6 м. Это обеспечивает транспортировку пучка с небольшими относительно апертуры квадрупольных линз размерами в обеих поперечных плоскостях и компенсацию дисперсии, создаваемой магнитами, поворачивающими весь канал на угол  $112^\circ$  в направлении медицинской зоны, а также разделяющими канал на два направления к изоцентрам  $T_1$  и  $T_2$ .

На вертикальном участке канала для обеих групп магнитов компенсация дисперсии осуществляется с помощью полевых квадрупольных линз, расположенных на равных

расстояниях от центров поворота, а для передачи пучка от первой группы магнитов ко второй используется триплет квадрупольных линз. Это позволяет существенно сократить продольные и вертикальные размеры этого участка, а также количество используемых квадрупольных линз.

Окончательная фокусировка пучка перед изоцентром осуществляется компактными триплетами квадрупольных линз. Перед каждой терапевтической установкой предусмотрен свободный от магнитооптического оборудования промежуток длиной 7 м, необходимый для размещения сканирующей системы и диагностического оборудования.

Всего для создания канала требуется 20 отклоняющих магнитов и 51 квадрупольная линза. Особенности конструкции трех отклоняющих магнитов и соответствующих вакуумных камер должны позволить использовать их для разделения трассы канала на отдельные участки. Из общего количества квадрупольных линз девять с диаметром апертуры 100 мм задействованы на начальном участке канала и в объективах, фокусирующих пучок на мишенях. На остальных участках канала применяются квадрупольные линзы с диаметром апертуры 75 мм.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена магнитооптическая схема канала транспортировки пучка ионов  $^{12}\text{C}^{+6}$  для проведения радиобиологических исследований. Приведены результаты замедления ионов углерода с энергиями от 455 до 200 МэВ/нуклон в ускорителе У-70 и вывода пучка из него. Сканирующая система, состоящая из вертикального и горизонтального вобблер-магнитов, позволяет обеспечить зону равномерного дозового поля диаметром более 100 мм с требуемым уровнем равномерности. Создание канала №26 позволит отработать и внедрить перспективную методику лечения пучком ионов углерода наиболее сложных (радиорезистентных) онкологических новообразований, а также выработать оптимальные технические и медицинские требования к типовому ионному центру для разработки и тиражирования в России.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Проект “Реконструкция здания 1БВ и здания 8 с целью создания экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем Ускорительном комплексе У-70, г. Протвино, Московская область” выполняются в рамках Государственной программы научно-технологического развития РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *O. Piccioni, D. Clark, R. Cool, G. Friedlander, D. Kassner* // *Rev. Sci. Instruments*. 1955. V. 26. P. 232. <https://doi.org/10.1063/1.1771259>
2. *Иванов С.В., Лебедев О.П.* // *ПТЭ*. 2013. № 3. С. 5.
3. *Sorriaux J., Kasperek A., Rossomme S. et al.* // *European Journal of Medical Physics*. 2013. V. 29. P. 599. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2012.10.001>
4. <http://www.gafchromic.ru/docs/ЕВТ3-3.pdf>.
5. *Гаркуша В.И., Запольский В.Н., Иванов С.В., Карташев В.П., Солдатов А.П.* Магнитооптическая система медицинского канала ионов углерода на ускорителе У-70. Препринт ИФВЭ 2022-10, Протвино, 2022.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис.1.** Схема магнитооптического канала для вывода ионного пучка.

**Рис. 2.** Замедление ионов углерода в У-70 до энергии 200 МэВ/нуклон: лучи 1, 2 – токи бампов 24/30 и 32/38; луч 3 – ток септум-магнита СМ<sub>34</sub>; луч 4 – интенсивность циркулирующего пучка.

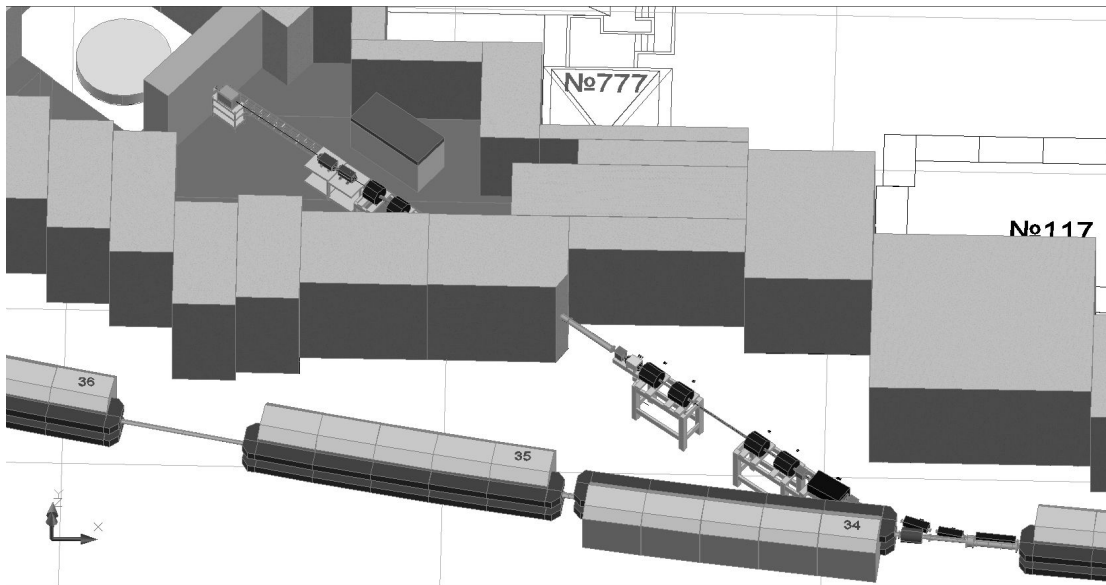
**Рис. 3.** Принципиальная схема вывода пучка из ускорителя У-70 (ПП – прямолинейный промежутки, ВМ – выводная мишень, СМ – септум-магнит).

**Рис. 4.** Вобблер-магниты и стойки источников питания (справа).

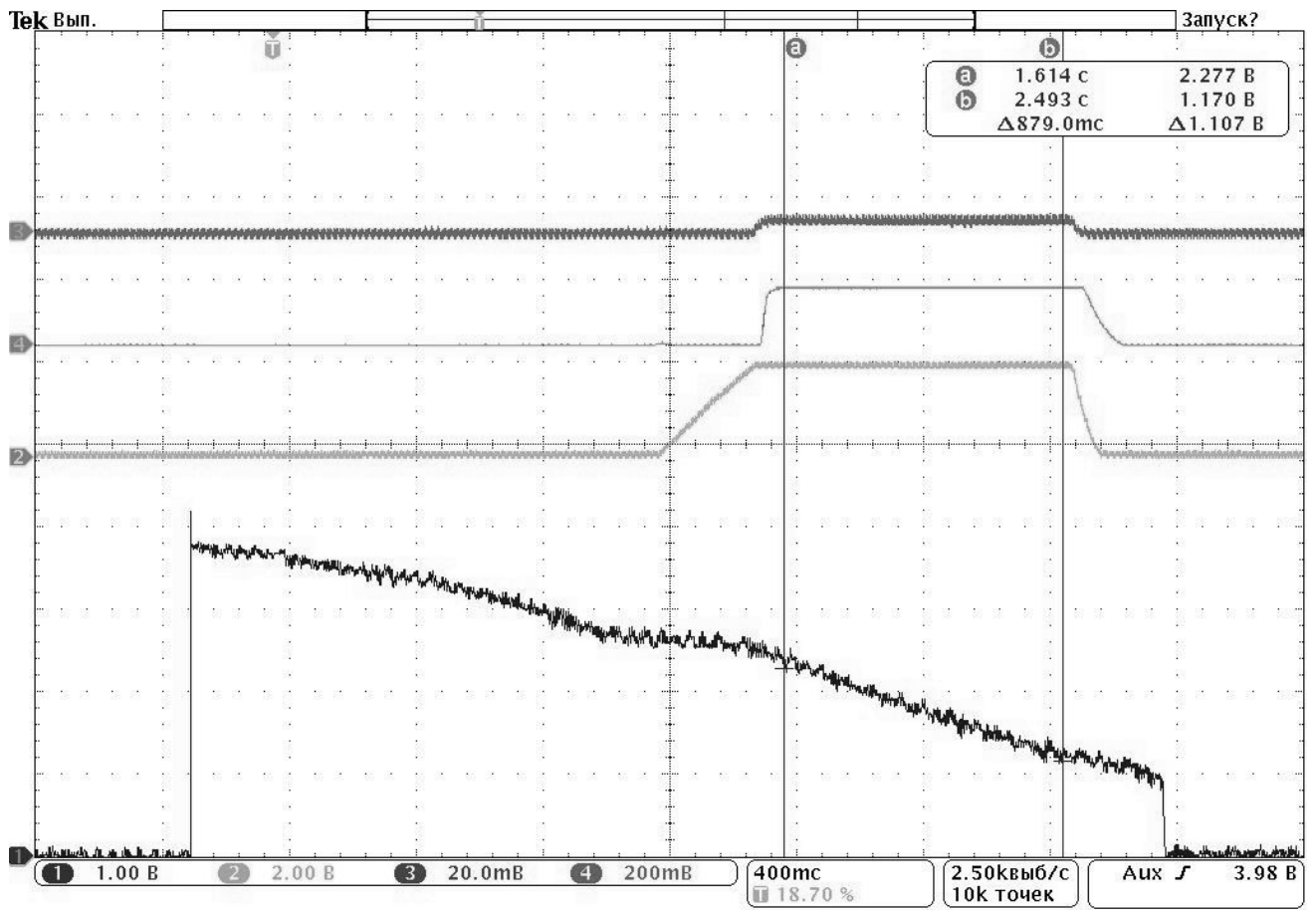
**Рис. 5.** Дозовое распределение в вертикальной плоскости перед изоцентром.

**Рис. 6.** Схема расположения канала №26 и медицинской зоны в экспериментальном зале У-70. (РБС – радиобиологический стенд).





**Рис. 1.**



17 Апр 2023  
11:04:32

Рис. 2.

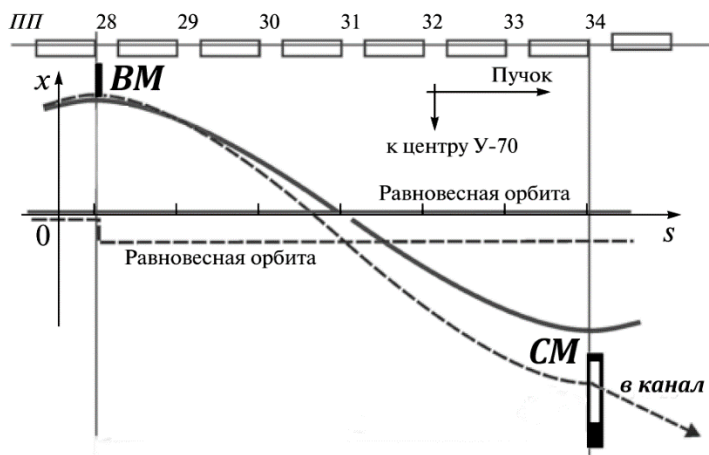
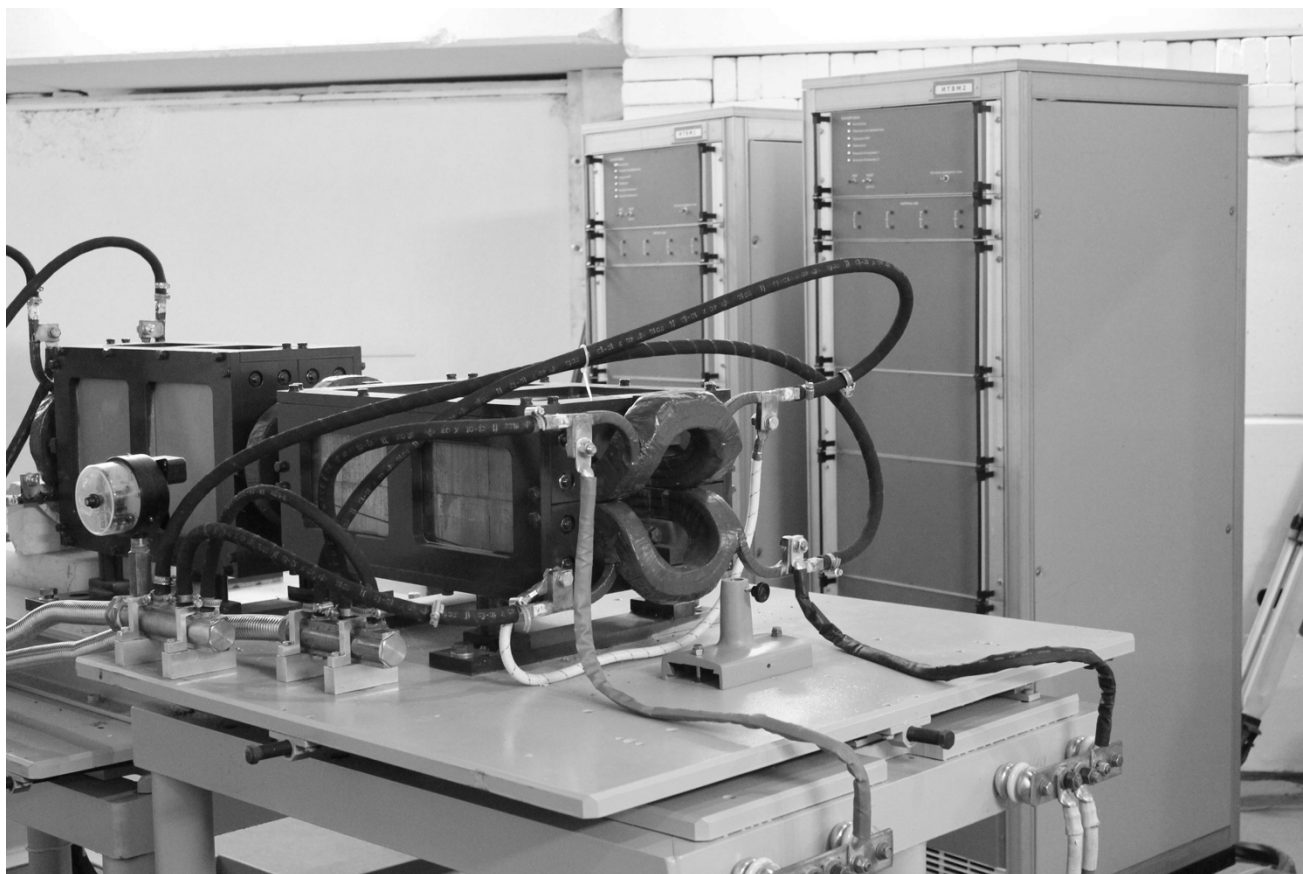
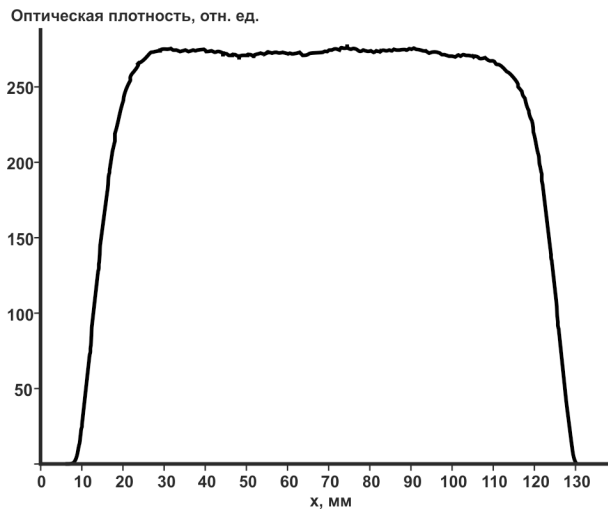


Рис. 3.



**Рис. 4.**



**Рис. 5.**

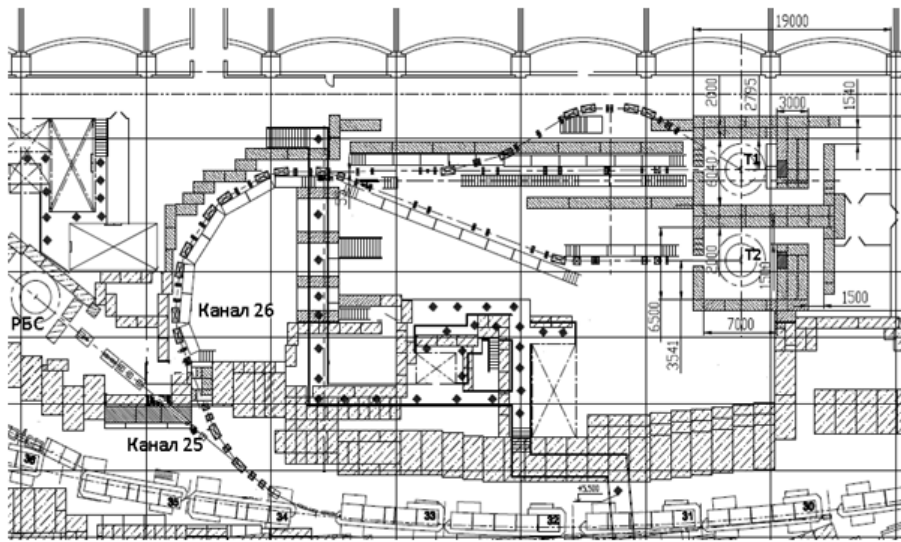


Рис. 6.

**Для связи с автором:**

**Гаркуша Валерий**

E-mail: [Valeriy.Garkusha@ihep.ru](mailto:Valeriy.Garkusha@ihep.ru)

Синюков Роман

E-mail: [rspro@ihep.ru](mailto:rspro@ihep.ru)

**Для переводчика:**

STATUS OF WORK ON CREATING CARBON ION BEAM CHANNELS FOR RADIOBIOLOGICAL AND PRECLINICAL STUDIES AT THE U-70 ACCELERATOR COMPLEX

We present an optical scheme of the channel for transporting  $^{12}\text{C}+6$  carbon ion beams to the radiobiological research area. The results of deceleration of carbon ions in the accelerator U-70 from 455 to 200 MeV/nucleon and beam output from U-70 are presented. The scheme of uniform dose field formation by means of vertical and horizontal wobbler magnets is considered. Plans for the development of ion-beam therapy channels at the IHEP accelerator complex are given.