

## ДИНАМИКА ПУЧКА В МОДЕРНИЗИРОВАННОМ ЦИКЛОТРОНЕ Ц-80 И СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ

*Ю. К. Осина<sup>1</sup>, А. В. Галчук, И. В. Горбунов, А. Н. Леухина*

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты моделирования динамики ионов водорода в модернизированном циклотроне Ц-80, который оснащен двумя каналами выпуска пучков различной интенсивности для производства радионуклидов и терапии онкоофтальмологических заболеваний. Вывод пучков будет осуществляться за счет перезарядки ионов  $H^-$  с последующим выпуском протонов. Для наработки радионуклидов из циклотрона будет выводиться пучок протонов с энергией в диапазоне 40–80 МэВ и током не менее 100 мкА, для решения онкоофтальмологических задач — пучок с энергией 70 МэВ и током порядка 1 мкА. Разработаны системы транспортировки терапевтического и радиоизотопного пучков.

The results of modeling of hydrogen ion dynamics in the modernized C-80 cyclotron, which is equipped with two channels of beam output of different intensities for the production of radionuclides and therapy of onco-ophthalmologic diseases, are presented. The output of the beams will be carried out by recharging the  $H^-$  ions, followed by the release of protons. For radionuclide production, a proton beam with an energy in the range of 40–80 MeV and a current of at least 100  $\mu A$  will be released from the cyclotron, for solving onco-ophthalmologic problems — a beam with an energy of 70 MeV and a current of about 1  $\mu A$ . Systems for transportation of therapeutic and radioisotope beams have been developed.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

АО «НИИЭФА» проводит модернизацию циклотронного комплекса, включающего в себя протонный циклотрон Ц-80 [1, 2], разветвленную систему транспортировки пучка, систему облучения образцов. Комплекс предназначен для наработки широкого спектра медицинских радионуклидов, диагностики и терапии социально значимых заболеваний (проект «Изотоп») и протонной терапии онкоофтальмологических заболеваний (проект «Око»). Особенностью работы является использование оборудования действующего циклотрона Ц-80 с модернизацией, перемещением его в проектируемое заново здание и дооснащением новым оборудованием.

В состав модернизируемого оборудования входят: вакуумная камера основного электромагнита, обдирочные устройства, разветвленная система транспортировки пучка к удаленным конечным устройствам, мишенный комплекс для наработки радионуклидов, оборудование онкоофтальмологического центра протонной лучевой терапии, система электропитания, вакуумная система, система водяного охлаждения, система автоматизированного управления циклотронного комплекса.

---

<sup>1</sup>E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ПУЧКА

Основной целью модернизации является создание второй системы вывода пучка из циклотрона, который также будет осуществляться путем перезарядки отрицательных ионов водорода на графитовой фольге [3]. Система в совокупности со специализированным каналом транспортировки обеспечит формирование пучка протонов малой интенсивности в интересах протонной терапии онкоофтальмологических заболеваний. Для установки дополнительного оборудования модернизируется корпус вакуумной камеры циклотрона. Улучшение характеристик высокоинтенсивного пучка протонов, используемого для производства радионуклидов, будет реализовано за счет

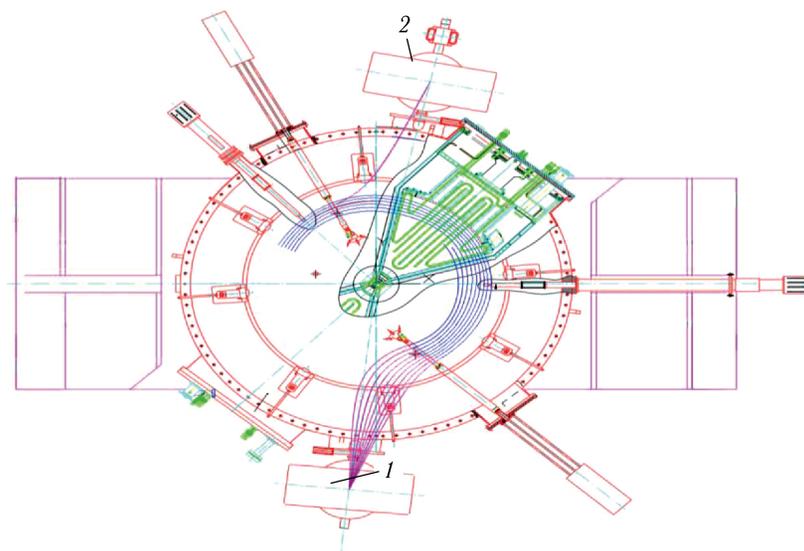


Рис. 1. Модернизированная вакуумная камера и траектории выведенных частиц из циклотрона Ц-80 в центры согласующих электромагнитов в диапазоне значений энергии 40–80 МэВ, «Изотоп» (1), 70 МэВ, «Око» (2)

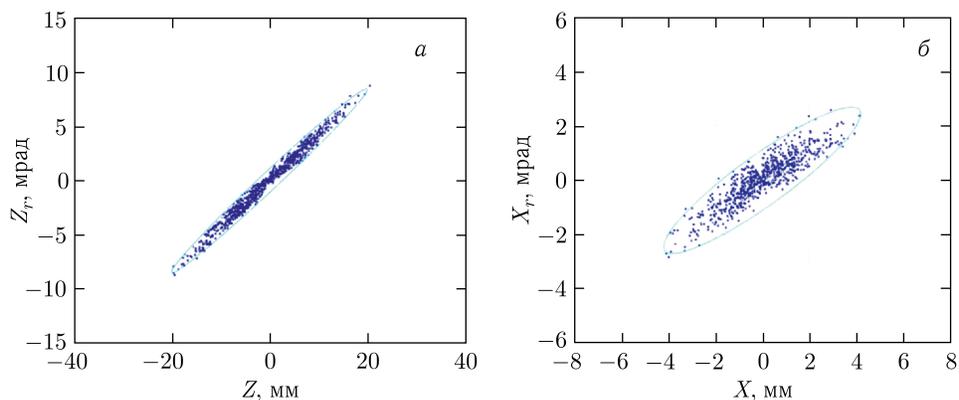


Рис. 2. Распределение частиц в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях в центре согласующего электромагнита для транспортировки пучка, канал «Око»

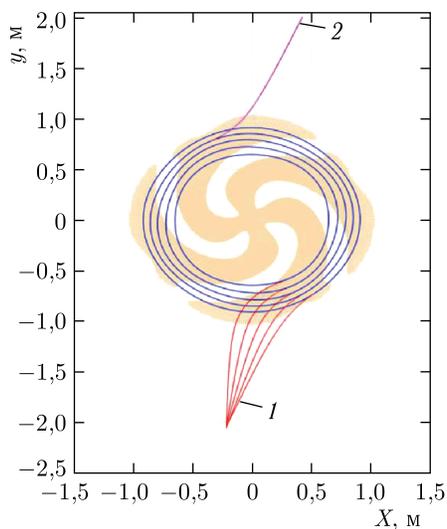


Рис. 3. Траектории частиц, выведенных из циклотрона в диапазоне значений энергии 40–80 МэВ в тракт «Изотоп» (1) и энергией 70 МэВ в тракт «Око» (2)

модернизации существующей системы вывода пучка, в частности, за счет модернизации согласующего электромагнита.

Оборудование модернизированной вакуумной камеры и рассчитанные траектории выведенных частиц из циклотрона в центр согласующего электромагнита для двух трактов транспортировки представлены на рис. 1.

Выполнен комплекс расчетов динамики пучка в циклотроне и системах вывода пучка. Распределения частиц в вертикальной и горизонтальной плоскостях в центре согласующего электромагнита для тракта транспортировки «Око» приведены на рис. 2.

На рис. 3 представлены траектории пучка на последнем обороте с выводом частиц в тракты транспортировки «Око» (70 МэВ) и «Изотоп» (40–80 МэВ).

### МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Для комплекса на базе циклотрона Ц-80 разрабатываются три канала транспортировки (рис. 4), два из которых предназначены для программы «Изотоп». Оборудование этих каналов должно обеспечить транспортировку высокоинтенсивного пучка с параметрами в зоне облучения: диаметр 35 мм, неоднородность распределения плот-

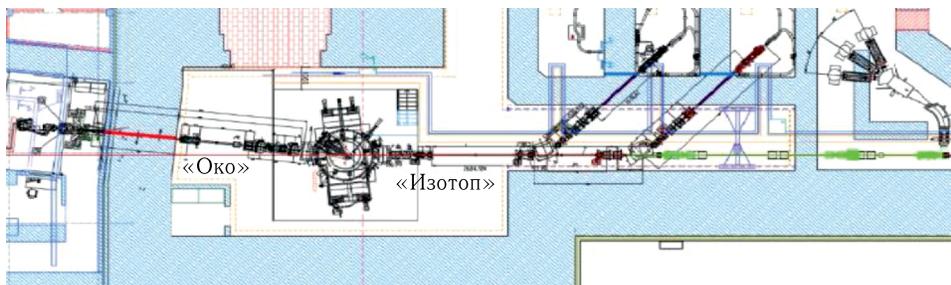
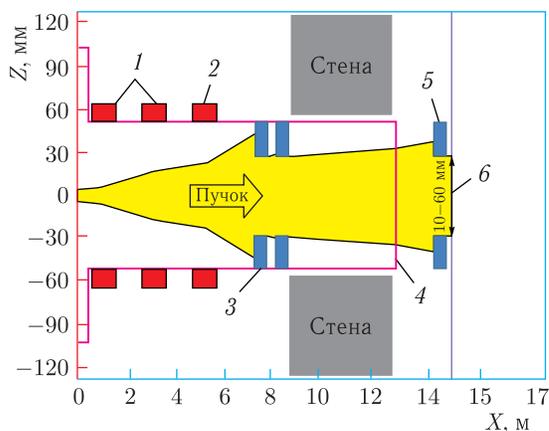


Рис. 4. Размещение циклотронного комплекса Ц-80 с каналами транспортировки пучка «Око», «Изотоп»

Рис. 5. Принципиальная схема формирования пучка в тракте «Око»: 1 — дублет линз; 2 — воблер; 3 — коллиматор; 4 — вывод пучка в атмосферу; 5 — коллиматор устройства формирования и контроля пучка; 6 — объект облучения



ности пучка по сечению не более 15% в диапазоне значений энергии 40–80 МэВ. Третий канал предназначен для программы «Око». Этот канал оснащается оборудованием, которое должно обеспечить выполнение существенно более жестких требований к пучку на мишени: пучок диаметром 60 мм интенсивностью не более 0,5 мкА и неравномерностью по поверхности не хуже  $\pm 5\%$ .

Для получения требуемых параметров пучка был разработан воблер, обеспечивающий вращение пучка по поверхности мишени.

Выполнен комплекс расчетов динамики пучка и характеристик оборудования каналов транспортировки пучка с учетом специфики их использования. Так, в канале «Око» пучок дефокусируется с последующим прохождением через воблер и коллиматор с целью получения более равномерного облучения на мишени (рис. 5).

Результаты расчетов огибающих пучка для трактов транспортировки «Изотоп» и «Око» представлены на рис. 6 и 7.

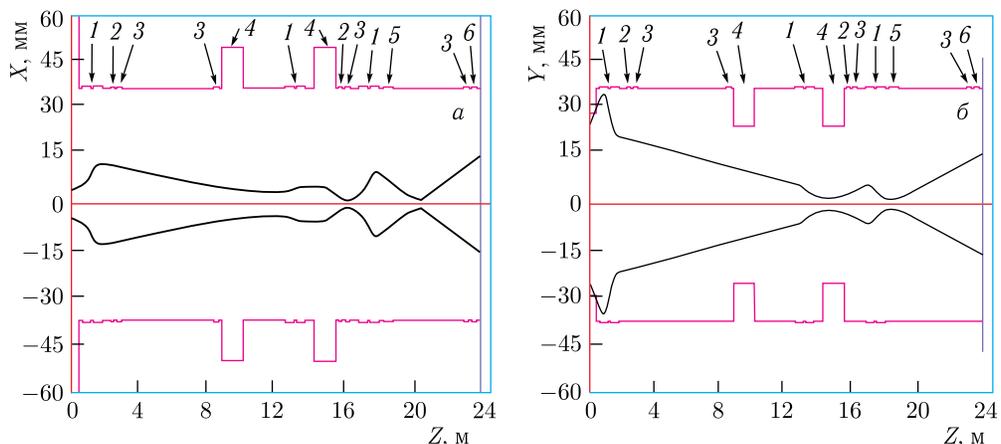


Рис. 6. Огибающие пучка в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях в транспортном канале «Изотоп»: 1 — дублет линз; 2 — корректирующий электромагнит; 3 — блок диагностики; 4 — поворотный электромагнит; 5, 6 — системы подготовки и измерения пучка

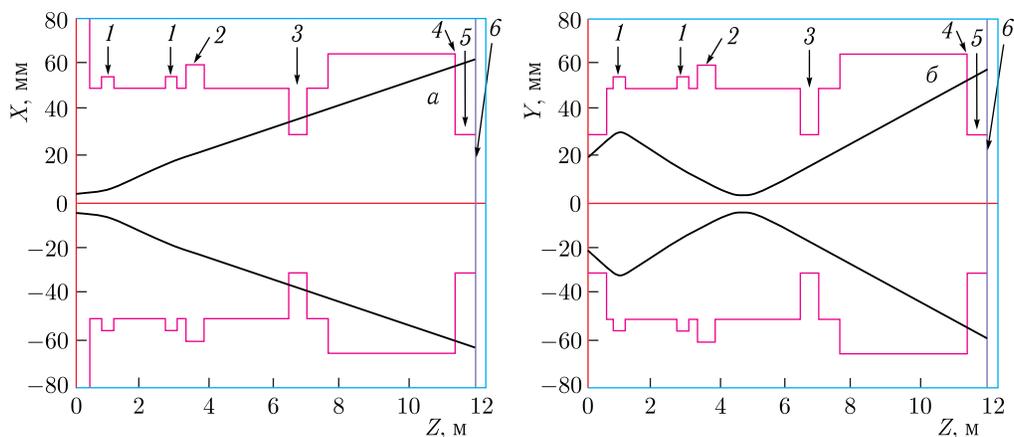


Рис. 7. Огибающие пучка в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях в транспортном канале «Око»: 1 — дублет линз; 2 — воблер; 3 — коллиматор; 4 — вывод пучка в атмосферу; 5 — коллиматор устройства формирования и контроля пучка; 6 — объект облучения

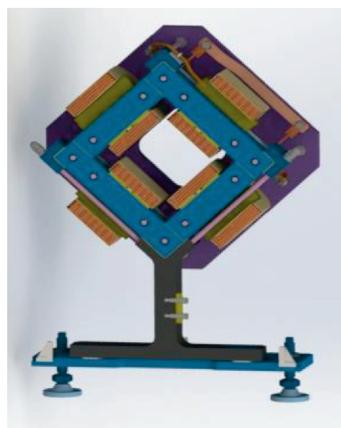


Рис. 8. 3D-модель воблера

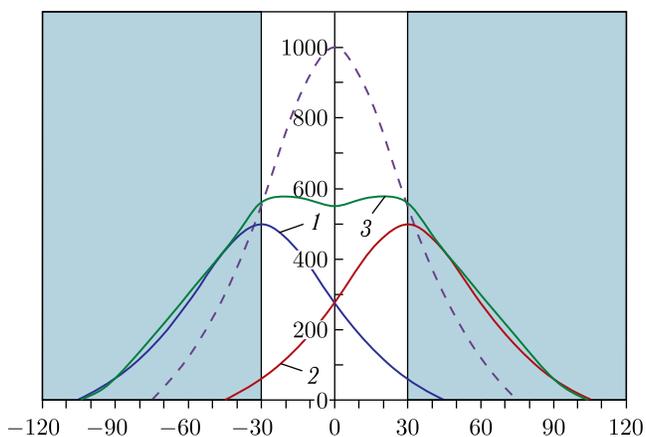


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Расчетная неравномерность плотности тока по сечению на объекте, расположенном в 2 м за стеной бункера. Синий и красный графики (1 и 2) — вращающийся пучок; зеленый график (3) — результирующая интенсивность; голубые области — коллиматор. Неравномерность интенсивности на площади диаметром 60 мм  $\Delta I_y/I_y = \pm 4,5\%$  (интенсивность в условных единицах)

Одним из важнейших узлов каналов транспортировки пучка является воблер. В разработанной модели воблера (рис. 8) амплитуда переменного магнитного поля 146 Гс с частотой питающего напряжения 10 Гц обеспечивает отклонение центра пучка на 34 мм относительно оси тракта транспортировки на расстоянии 6,27 м

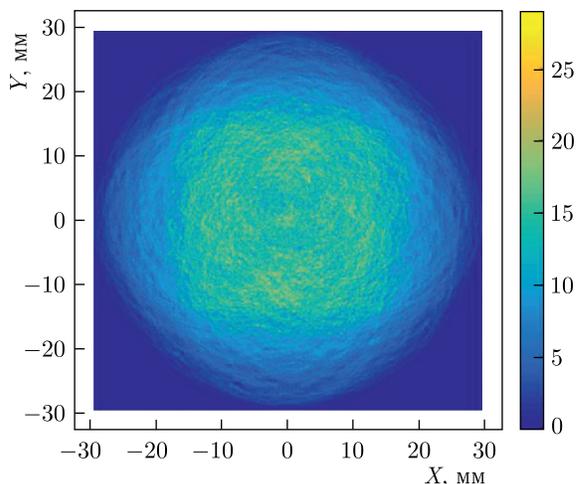


Рис. 10. Сечение пучка на мишени для канала «Изотоп» (воблер включен)

от центра воблера до мишени. При данных параметрах неравномерность распределения пучка не превышает  $\pm 4\%$ . Суммарные потери интенсивности пучка в тракте транспортировки «Око» оцениваются в 60–70% от интенсивности пучка на выходе из вакуумной камеры циклотрона.

Расчетная неравномерность плотности тока по сечению на объекте облучения (канал «Око»), располагающемся в 2 м за стеной бункера (воблер включен), приведена на рис. 9. Сечение пучка на мишени для канала «Изотоп» показано на рис. 10.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены расчетные работы по выводу пучка из циклотрона Ц-80, транспортировке и формированию терапевтического пучка малой интенсивности («Око») и радиоизотопных пучков («Изотоп»). Определены характеристики оборудования трактов транспортировки, которые обеспечат необходимую равномерность пучка на мишени.

К настоящему времени магнитные узлы системы транспортировки пучка и модернизированная вакуумная камера циклотрона разработаны и находятся в производстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Kuzhlev A. N., Mudrolyubov V. G., Amerkanov D. A., Artamonov S. A., Ivanov E. M., Riabov G. F., Yurchenko V. I.* Physical Start-Up of the C-80 Isochronous Cyclotron // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 179–181.
2. *Ванин А. В., Гавриш Ю. Н.* Современные циклотронные комплексы НИИЭФА // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 764–769.
3. *Artamonov S. A., Chernov A. N., Ivanov E. M., Riabov G. A., Tonkikh V. A., Konstantinov B. P.* High Efficiency Stripping Extraction on 80 MeV H-Minus Isochronous Cyclotron in PNPI // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 176–178.

Получено 15 сентября 2023 г.