

МНОГОЦЕЛЕВОЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЦИКЛОТРОНА Ц-80

*Р. М. Клопенков¹, А. А. Акимова, Ю. Н. Гавриш, И. В. Горбунов,
И. В. Лазарев, А. Н. Леухина, В. П. Лугин, М. Л. Клопенков,
К. А. Кравчук, Ю. К. Осина, Д. Н. Степанов, М. В. Усанова,
С. А. Трифонов*

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Представлен проект многоцелевого комплекса на базе установленного в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ циклотрона Ц-80. Комплекс оснащается мишенными станциями, позволяющими производить широкий спектр радиоизотопов, в том числе изотопически чистых альфа-эмиттеров, для диагностики онкологических, сердечно-сосудистых и неврологических заболеваний. С целью оказания услуг по протонной терапии офтальмологических заболеваний создается система выпуска, формирования и транспортировки терапевтического пучка протонов.

The project of a multipurpose complex based on the C-80 cyclotron installed at the NRC “Kurchatov Institute” – PNPI is presented. The complex is equipped with target stations that allow the production of a wide range of radioisotopes, including isotopically pure alpha emitters, for diagnostics of oncologic, cardiovascular and neurologic diseases. In order to provide proton therapy services for ophthalmic diseases, a system for the release, formation and transportation of a therapeutic proton beam is being created.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

АО «НИИЭФА» проводит работы по созданию в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ многоцелевого циклотронного комплекса, обеспечивающего получение широкого спектра радиоизотопов для диагностики онкологических, сердечно-сосудистых и неврологических заболеваний и дополнительно оснащенного оборудованием для формирования и транспортировки протонного пучка малой интенсивности для использования в целях онкоофтальмологии.

Особенностью проекта является использование значительной части оборудования существующего циклотрона Ц-80 [1], обеспечивающего получение ускоренного пучка протонов с энергией в диапазоне 40–80 МэВ. В настоящее время циклотрон с системой транспортировки размещен на двух уровнях здания (рис. 1).

¹E-mail: npkluts@luts.niefa.spb.su

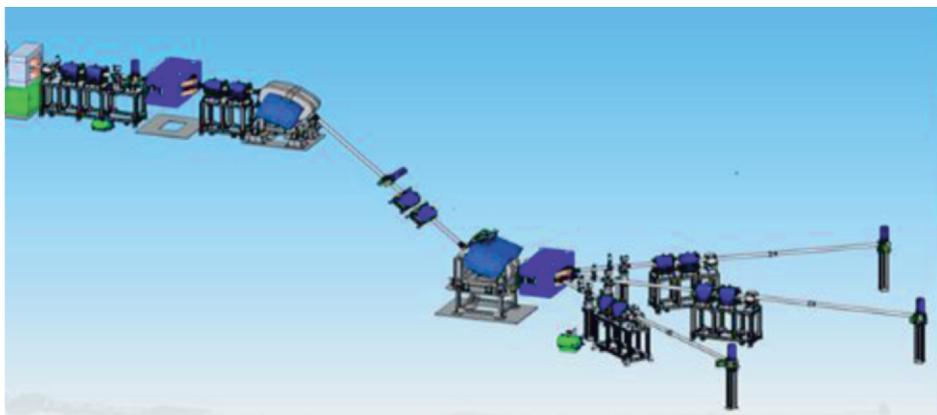


Рис. 1. Схема существующего размещения циклотрона Ц-80 и системы транспортировки

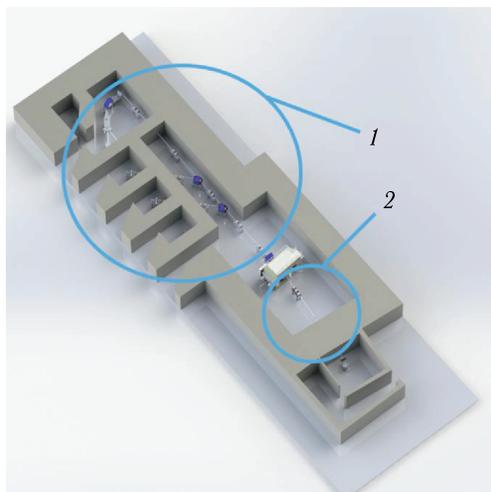


Рис. 2. Схема размещения радиоизотопного комплекса в радиационно-защитных помещениях нового здания (1 — оборудование для наработки радионуклидов; 2 — система выпуска, формирования и транспортировки терапевтического пучка протонов)

В рамках проекта циклотрон Ц-80 перемещается во вновь сооружаемое здание, оснащается тремя мишенными станциями для производства генераторных радионуклидов и изотопически чистых альфа-эмиттеров, модернизированной системой транспортировки пучка к мишенным станциям, дополнительной системой выпуска, формирования и транспортировки пучка протонов малой интенсивности для онкоофтальмологического центра протонной лучевой терапии, а также дополнительным оборудованием для вакуумной откачки, электропитания, водяного охлаждения и управления. Предварительная схема размещения комплекса в радиационно-защитных помещениях нового здания приведена на рис. 2.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

В циклотроне Ц-80 применен электромагнит Ш-образного исполнения с электро-механической системой подъема верхней балки, система внешней инъекции отрицательных ионов водорода размещена в подвальном помещении. Топология изохронного магнитного поля сформирована, электромагнит испытан в составе циклотрона. В 2016 г. на первом цилиндре Фарадея получен проектный ток пучка протонов в диапазоне значений энергии 40–75 МэВ.

Резонансная ускоряющая система, система высокочастотного питания, система внешней инъекции, существующее оборудование обеспечивающих систем испытаны в составе циклотрона, но подлежат автономным испытаниям после перемещения в новое здание с возможной заменой отдельных комплектующих.

Система вывода терапевтического пучка малой интенсивности. Уникальным для данного проекта является оснащение существующего циклотрона дополнительным выводом протонного пучка.

Для реализации данного решения были проведены тщательные расчеты динамики пучка и в существующую конструкцию циклотрона добавлено дополнительное стрипперное устройство, позволяющее выпустить пучок в противоположную сторону от существующего вывода [2]. При этом удалось конструктивно обойти оборудование, установленное на вакуумной камере циклотрона (рис. 3).

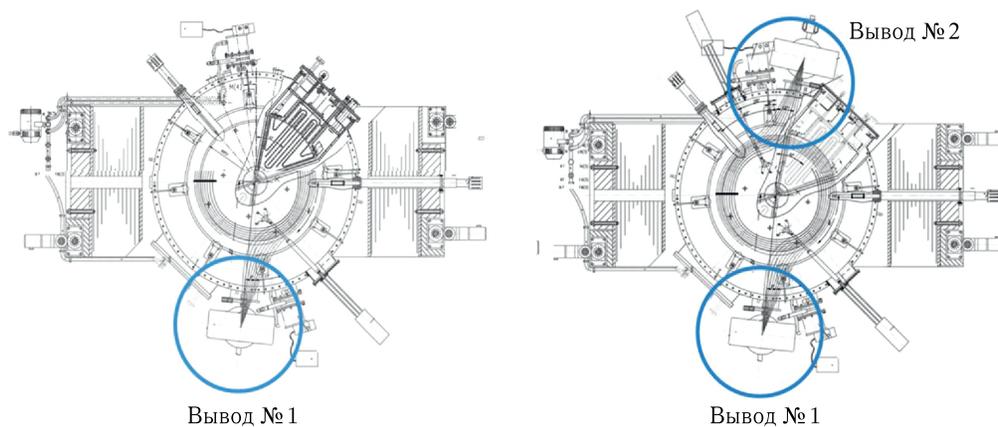


Рис. 3. Сравнение изначальной конструкции с одним выводом пучка (слева) и модернизированной конструкции с двумя выводами (справа)

Система транспортировки пучка протонов высокой интенсивности. Система состоит из трех трактов. Тракт транспортировки от выпускного патрубка циклотрона к мишенной станции для радиохимического выделения радионуклидов включает в себя: согласующий электромагнит, четыре квадрупольные линзы, два корректирующих электромагнита, три блока диагностики с цилиндрами Фарадея и датчиками плотности пучка, поворотный электромагнит, воблер и коллиматор. Тракт транспортировки от патрубка вакуумной камеры поворотного электромагнита (прямое направление) к высокотемпературной мишенной станции включает в себя: четыре квадрупольные

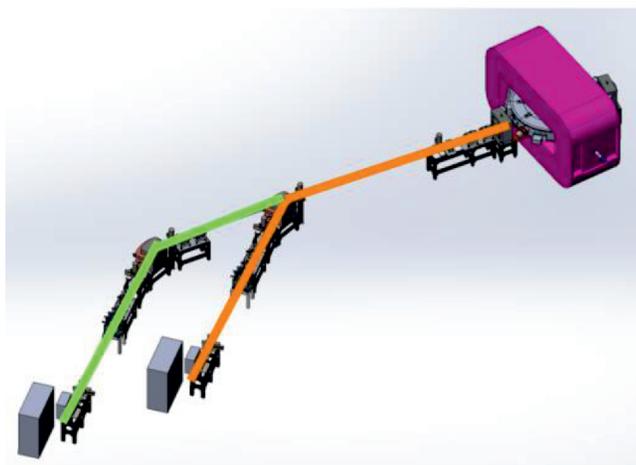


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Схема транспортировки пучка к мишенным станциям. Оранжевый цвет — тракт транспортировки к мишенной станции № 1; зеленый цвет — тракт транспортировки к мишенной станции № 2

линзы, корректирующий электромагнит, два блока диагностики с цилиндрами Фарадея и датчиками плотности пучка, поворотный электромагнит, воблер и коллиматор. Схема размещения трактов представлена на рис. 4 (поворотные электромагниты не показаны). Разработка третьего тракта не завершена.

Узлы системы транспортировки можно условно разделить на три категории:

- существующие узлы, которые будут использованы без изменений (согласующий электромагнит, поворотные электромагниты, квадрупольные линзы, корректирующий электромагнит, блоки диагностики с датчиками плотности пучка);
- узлы, требующие частичной или полной переработки (вакуумные камеры и подставки поворотных электромагнитов, цилиндры Фарадея);
- узлы, разрабатываемые впервые (воблер и коллиматор).

Мишенный комплекс. Мишенный комплекс должен обеспечить возможность производства широкого ассортимента радионуклидов. К настоящему времени заказчиком сформулированы требования, относящиеся только к производству генераторных радионуклидов ^{82}Sr , ^{68}Ge и полностью автоматизированной транспортировке готовых к облучению мишеней и наработанной активности.

Комплекс включает в себя: мишенную высокотемпературную станцию и мишенную станцию для радиохимического выделения радионуклидов. Станции идентичны по составу и характеристикам оборудования, кроме оборудования пневмотранспортировки.

В состав мишенной станции входят:

- мишень для наработки радионуклида ^{82}Sr ;
- мишень для наработки радионуклида ^{68}Ge ;
- устройство удержания мишени под пучком;
- система пневмотранспортировки мишеней;

- система подготовки и измерения пучка;
- система водяного охлаждения;
- система гелиевого охлаждения;
- система обеспечения рабочими средами;
- система автоматического дистанционного управления.

Особенностью проекта является установка под пучок последовательно двух мишеней для одновременной наработки радионуклидов, периоды полураспада которых отличаются на порядок (25,5 сут — ^{82}Sr и 271 сут — ^{68}Ge). Мишени представляют собой герметичные капсулы, содержащие стартовый материал (натуральный хлорид рубидия и металлический натуральный галлий). Капсулы помещаются в мишенные шаттлы (рис. 5) с максимальным диаметром 155 мм и длиной 93 мм, обеспечивающие транспортировку по пневмомагистралям и охлаждение в процессе облучения. Первой

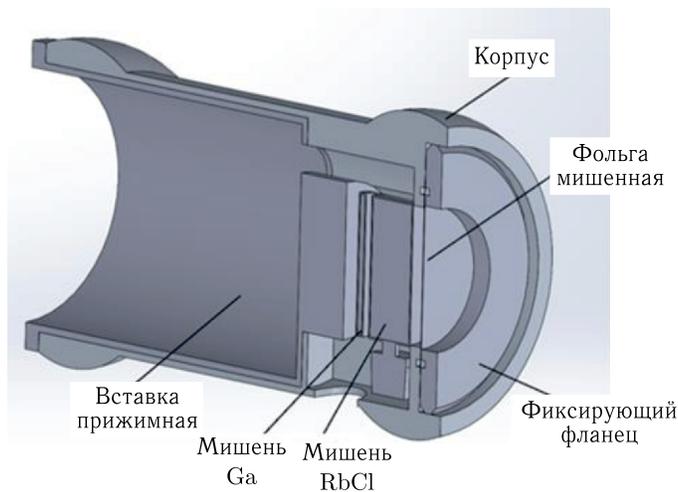


Рис. 5. Модель мишенного шаттла

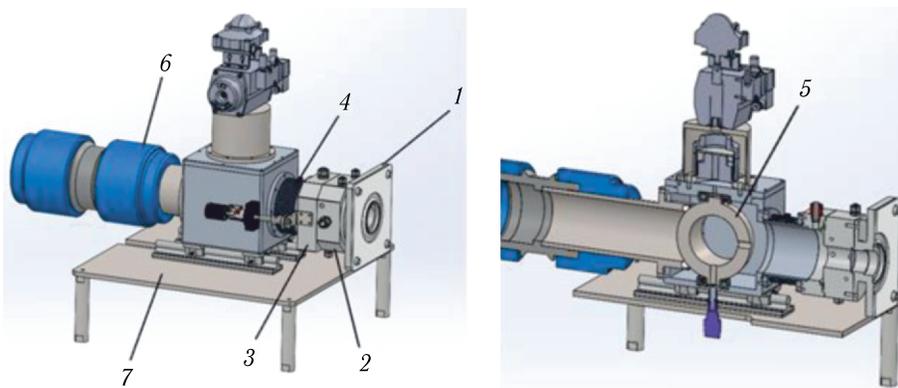


Рис. 6. Устройство удержания мишени: 1 — фланец фиксации вакуумной фольги; 2 — фланец гелиевых каналов; 3 — фланец стыковки; 4 — сильфон тарельчатый; 5 — шаровый механизм в корпусе; 6 — прижимной фланец с компрессионным фитингом; 7 — плата с направляющими

по ходу пучка устанавливается мишень для наработки радионуклида ^{82}Sg , толщина которой рассчитана на торможение протонов до энергии порядка 30 МэВ. Полное торможение протонов происходит в мишени для наработки радионуклида ^{68}Ge . Предварительно выбранное время облучения 7 сут. В случае отсутствия необходимости одновременной наработки радионуклидов вместо мишеней могут быть установлены капсулы-заглушки, обеспечивающие необходимую потерю энергии протонов.

Устройство удержания мишени фиксирует шаттл в заданном положении, производит его замену в автоматическом режиме, обеспечивает эффективное охлаждение. Принципиальная конструкция устройства приведена на рис. 6.

Система пневмотранспортировки. Система пневмотранспортировки служит для автоматической доставки подготовленных мишеней из радиохимических лабораторий к мишенным устройствам и облученных мишеней в радиохимические лаборатории. В состав мишенной высокотемпературной станции входят: первичный узел, распределительный узел и узел захвата радиохимического блока (РХБ). Первичный узел пневмотранспортировки предназначен для доставки шаттла от устройства удержания мишени до распределительного узла и состоит из вихревого вентилятора, пневмоподводов, пневмомагистралей, маршрутизаторов, узлов связи с атмосферой, вакуумного клапана и индукционного датчика. Распределительный узел состоит из двух маршрутизаторов направлений. Узел захвата РХБ содержит насос вакуумный мембранный (НВМ), клапан вакуумный, узел связи с атмосферой, клапаны распределительные и индукционный датчик.

Система пневмотранспортировки мишенной станции для радиохимического выделения радионуклидов состоит только из первичного узла.

Функциональная схема транспортировки мишеней для мишенной высокотемпературной станции и мишенной станции для радиохимического выделения радионуклидов представлена на рис. 7 (зеленым цветом выделен путь транспортировки мишенного шаттла от мишенной станции № 1 в приемную горячую камеру).

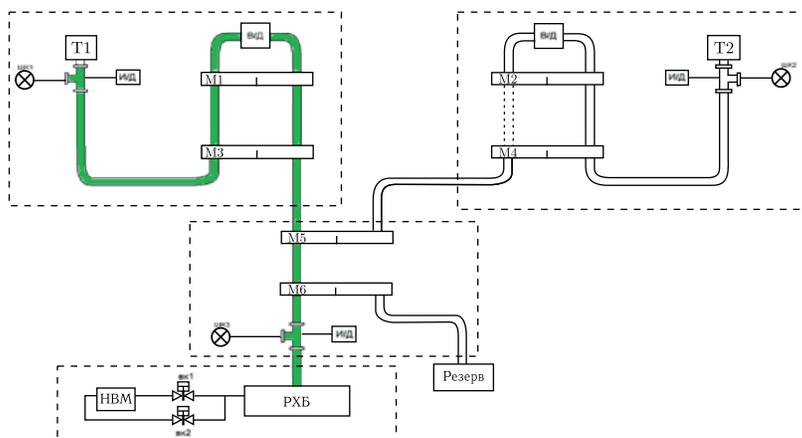


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Функциональная схема системы пневмотранспортировки

Система транспортировки пучка протонов малой интенсивности. Система транспортировки пучка протонов малой интенсивности должна соответствовать жестким требованиям к равномерности распределения плотности пучка по сечению ($\pm 5\%$).

В состав тракта транспортировки входят: согласующий электромагнит, аналогичный существующему, блок диагностики, две квадрупольные линзы, корректирующий электромагнит, воблер, система диафрагмирования и измерения параметров пучка. Схема размещения тракта представлена на рис. 8.

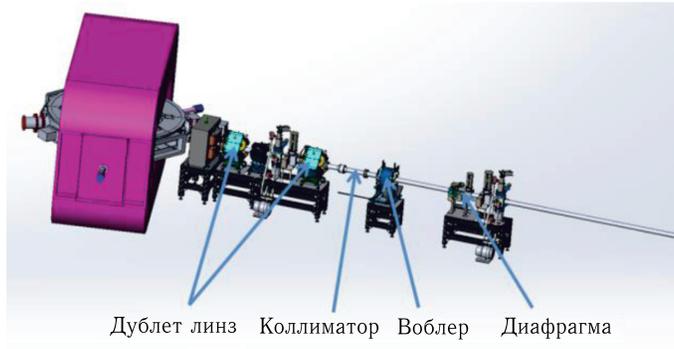


Рис. 8. Схема транспортировки пучка в процедурное помещение

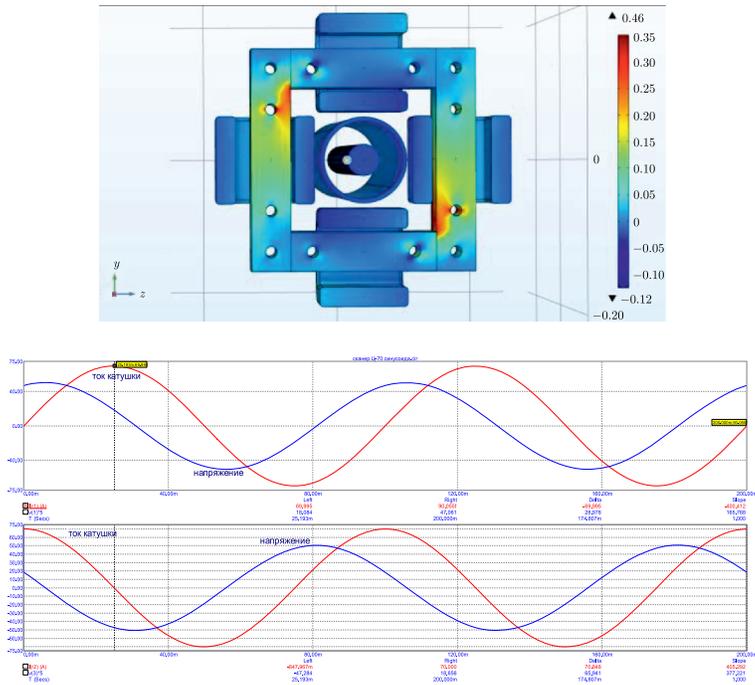


Рис. 9. Расчетная модель воблера и форма напряжения на катушках

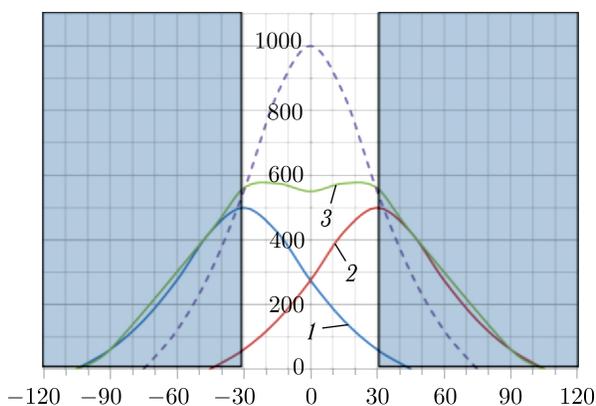


Рис. 10 (цветной в электронной версии). Графики распределения интенсивности пучка. Штриховой кривой показан пучок без вращения воблером. Синяя (1) и красная (2) кривые — вращающийся пучок; зеленая (3) кривая — результирующий пучок. Синие рамки — диафрагма

Уникальной для данного проекта является возможность обеспечения требуемой равномерности «активным» методом при помощи использования воблера, состоящего из магнитопровода и четырех катушек, на которые подается смещенное по фазе синусоидальное напряжение (рис. 9).

Воблер позволяет вращать пучок на фиксированном радиусе, кардинально влияя на распределение плотности результирующего пучка при обрезании диафрагмой паразитной составляющей (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершена стадия технического проектирования. Разработана и передана в производство конструкторская документация. В проекте использован опыт разработки мишенных устройств и систем доставки пучка, полученный ранее при создании циклотронного комплекса для Королевства Таиланд. В рамках реализации проекта удалось найти решение сложной задачи оснащения существующего циклотрона Ц-80 дополнительным выводом. Было предложено и находится в стадии реализации решение для «активного» формирования пучка с высокой равномерностью распределения плотности пучка по сечению.

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. (RuPAC 2016), Saint Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 179–181.
2. Осина Ю. К., Галчук А. В., Горбунов И. В., Леушина А. Н. Динамика пучка в модернизированном циклотроне Ц-80 и системе транспортировки // Тр. 28-й Рос. конф. по ускорителям частиц (RuPAC 2023), Новосибирск, Россия, 11–15 сент. 2023 г.

Получено 15 сентября 2023 г.