

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЦИКЛОТРОНА Ц-250

*К. Е. Смирнов¹, А. А. Акимова, О. В. Ананьева, Ю. Н. Гавриш,
А. В. Галчук, Д. В. Кирцев, В. Г. Мудролюбов,
Ю. К. Осина, Ю. И. Стогов*

АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

АО «НИИЭФА» разрабатывает уникальный циклотронный комплекс Ц-250. Циклотрон должен обеспечивать получение пучков протонов с энергией в диапазоне 30–250 МэВ и током до 5 мкА. Представлена информация о компоновке и конструкции основных систем циклотрона.

JSC “NIIEFA” is designing the C-250 cyclotron system. The cyclotron should ensure the production of proton beams in the energy range of 30–250 MeV and with a current of up to 5 μ A. The information on the layout and design of the main systems of the cyclotron is presented.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Протонные циклотроны с энергией порядка 250 МэВ не являются новым словом в ускорительной технике, хотя и создаются достаточно редко. В настоящее время машины с такими энергиями создаются в первую очередь в интересах протонной терапии. Они имеют ряд особенностей, обусловленных их назначением:

- компактность, которая достигается за счет применения сверхпроводящих основных катушек, а также маленького зазора между секторами полюсных наконечников;
- невысокие токи ускоренных пучков (сотни наноампер в непрерывном режиме либо микроамперы в импульсном режиме);
- относительная простота циклотрона — отсутствие регулировки по энергии выпущенного пучка, что, в свою очередь, не требует перестройки частоты высокочастотной системы и карты магнитного поля.

Циклотрон Ц-250 должен иметь следующие основные характеристики:

- тип ускоряемых частиц — протоны;
- энергия протонов — регулируемая от 30 до 250 МэВ;
- ток пучка — до 5 мкА в непрерывном режиме;
- тип магнита — «теплый», магнитопровод Ш-образного типа.

Из этих требований видно, что ускоритель Ц-250 — это установка другого класса по сложности устройства и габаритам в отличие от циклотронов для протонной терапии.

¹E-mail: smirnov@luts.niiefa.spb.su

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Основные характеристики электромагнитов и резонансных систем современных циклотронов взаимосвязаны и подчиняются известным законам, обеспечивающим изохронный режим ускорения ионов, т. е. независимость времени прохождения витка спирали от энергии ионов. Для получения протонов с энергией в диапазоне 30–250 МэВ должна быть обеспечена возможность практически трехкратного изменения индукции магнитного поля и рабочей частоты ускоряющей системы. При этом закон увеличения средней индукции к конечному радиусу определяется релятивистским увеличением массы протона, т. е. зависит от конечной энергии. Формирование топологии магнитного поля, соответствующей изохронному движению протонов в проектном диапазоне энергий, является исключительно важной проблемой.

Основные технические решения по циклотрону Ц-250 были представлены в работе [1]. Главным из них было разделение диапазона конечных энергий между двумя типами ускоряемых частиц: отрицательными ионами водорода и протонами. Граничная энергия, 125 МэВ, определена численным исследованием потерь интенсивности пучка отрицательных ионов за счет электродиссоциации.

Принятое решение существенно облегчило требования к формированию магнитного и высокочастотного полей. Базовый режим, соответствующий изохронному ускорению протонов до конечной энергии 250 МэВ, формируется «железом» при максимальном токе в основной обмотке. Формирование магнитного поля в диапазоне значений энергии 250–125 МэВ реализуется за счет уменьшения тока в основной обмотке и включения корректирующих катушек, размещенных на секторах. Рабочая частота резонансной системы при этом регулируется в диапазоне 33,2–24 МГц. Ускорение отрицательных ионов водорода осуществляется в магнитном поле, сформированном для конечной энергии 125 МэВ, высокочастотным электрическим полем с частотой 24 МГц.

Циклотрон Ц-250 имеет ряд принципиальных особенностей, отличающих его от разработанного чуть ранее циклотрона многозарядных ионов:

- высокие частоты обращения ускоряемых частиц;
- необходимость обеспечения жесткой фокусировки пучков;
- сильное влияние релятивистского эффекта на изохронную зависимость магнитной индукции от радиуса;
- использование внутреннего источника ионов;
- использование двух систем вывода пучков из циклотрона.

МАГНИТОПРОВОД ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Визуально магнитопровод циклотрона Ц-250 (рис. 1) выглядит очень похожим на магнитопровод циклотрона МЗИ, поскольку совпадают основные массогабаритные требования: максимальный размер не более 8100 мм, диаметр полюса не более 4000 мм, максимальная масса неразборной детали 28 т. Однако конструкция магнитопровода заметно усложнена. Во-первых, для обеспечения фокусировки пучков протонов применены сектора высокой спиральности. Во-вторых, для размещения резонансной системы в долинах предусмотрены сквозные отверстия. В результате некоторые плиты, формирующие верхнюю и нижнюю балки, оказались разрезаны на две

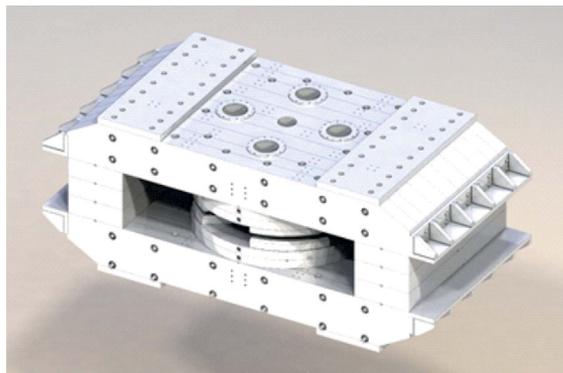


Рис. 1. Магнитопровод циклотрона Ц-250, 3D-модель

части. Для удобства сборки, сохранения жесткости конструкции и соблюдения точности разработаны дополнительные элементы крепления плит, часть плит оснащена опорными выступами. В связи с тем, что полюса и балки магнитопровода являются сборными, в сквозных отверстиях долин устанавливаются «стаканы», обеспечивающие герметичность вакуумной камеры электромагнита. Предусмотрено оперативное перемещение центральных пробок с помощью электроприводов для регулировки зазора в диапазоне 140–180 мм.

Магнитопровод оснащен системой подъема верхнего полуярма.

СИСТЕМА КАТУШЕК ВОЗБУЖДЕНИЯ

Базовый режим обеспечивается двумя катушками основной обмотки, выполненными из плого водоохлаждаемого проводника размером в сечении 29×29 мм. Каждая катушка содержит 200 витков, максимальный рабочий ток 900 А. Масса катушки 17 т, внешний диаметр 5,4 м. Суммарная мощность питания порядка 110 кВт.

Для транспортировки катушек разрабатывается специальная оснастка, которая позволит перевезти их по дорогам с помощью автотранспорта. Оснастка даст воз-

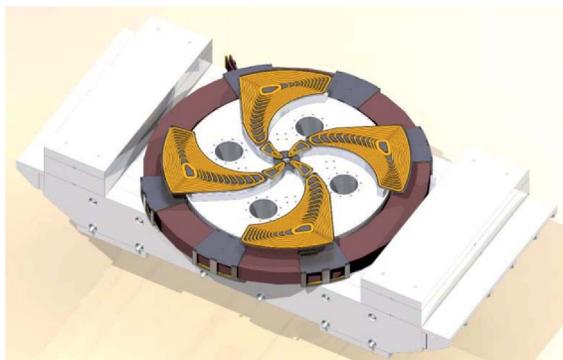


Рис. 2. Магнитные катушки, 3D-модель

возможность везти катушки под углом 45° , чтобы уменьшить габарит по ширине. При проезде под мостами катушка будет опускаться.

Для формирования магнитных полей в режимах с конечной энергией протонов 250–125 МэВ разработана система корректирующих катушек (рис. 2), в состав которой входят две кольцевые катушки, установленные симметрично относительно оси электромагнита, и 16 сборок, установленных на секторах (по две сборки, 14 катушек на сектор). Ввиду высоких требований по току и ограничений по допустимым размерам все корректирующие катушки выполнены из полого проводника с водяным охлаждением. Корпуса сборок являются вакуум-плотными, из внутренних полостей осуществляется форвакуумная откачка. Проводники катушек выводятся в атмосферу через фланцы корпусов. Суммарная мощность источников питания около 100 кВт.

РЕЗОНАНСНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Резонансная система состоит из двух зеркально-симметричных резонаторов, размещенных в оппозитных долинах. При традиционном для АО «НИИЭФА» исполнении резонаторов с выводом дуантных штоков через корпус вакуумной камеры невозможно реализовать требуемый диапазон рабочих частот. В разработанной конструкции внутренний проводник каждого резонатора состоит из двух дельта-электродов и двух дуантных штоков. Внешний проводник образуют верхняя и нижняя плакировки долины и два бака, которые размещаются в «стаканах», герметизирующих сквозные отверстия долин (рис. 3). Форма плакировок и дельта-электродов подобна форме долин и имеет ярко выраженную спиральность. Со стороны, обращенной к медианной плоскости, каждый дельта-электрод крепится к каркасу из нержавеющей стали. Плакировки крепятся к плоским поверхностям долин. Соединения дельта-электродов с дуантными штоками и плакировок с баками являются разъемными. Дуантные штоки крепятся к торцевым фланцам «стаканов», предусмотрены регулировочные винты для неоперативной юстировки дельта-электродов. В зазорах между поверхностями штоков

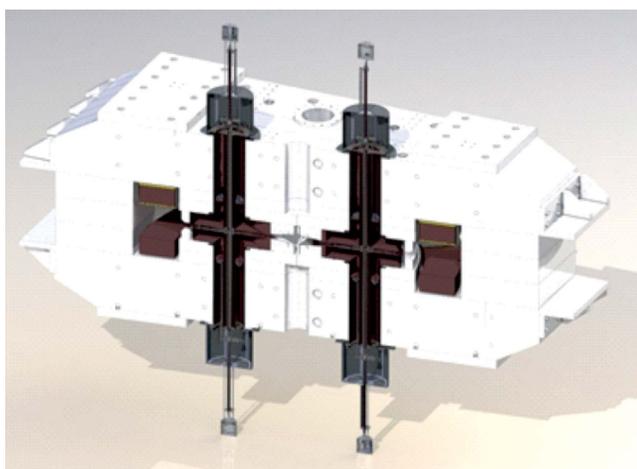


Рис. 3. Резонансная система циклотрона Ц-250, 3D-модель

и баков установлены подвижные закорачивающие фланцы с шариковыми контактами. Синхронное перемещение четырех фланцев обеспечивает регулирование рабочей частоты резонансной системы в диапазоне 24–33,2 МГц.

При подъеме верхнего полуярма резонансная система разделяется на две независимые части: верхнюю и нижнюю. В рабочем положении между частями обеспечивается прижимной гальванический контакт.

УСТРОЙСТВА ВЫВОДА ПУЧКА

Для вывода ускоренных протонов из циклотрона Ц-250 проектируются дефлектор, магнитный канал и обдирочное устройство.

В связи с широким диапазоном конечных энергий электростатический дефлектор разделен на две части и оснащен двумя независимыми электроприводами (рис. 4).

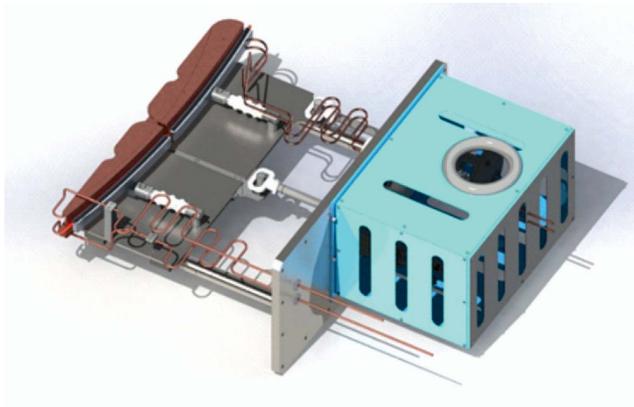


Рис. 4. Эскиз дефлектора циклотрона Ц-250

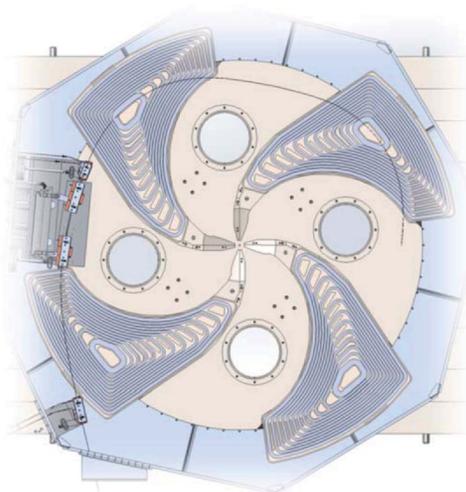


Рис. 5. Расположение частей магнитного канала

Первый из них обеспечивает перемещение по радиусу дефлектора в целом, второй реализует перемещение выходной точки первой части и входной точки второй части.

Пассивный магнитный канал состоит из трех частей (рис. 5), выполненных на базе постоянных магнитов, и обеспечен системой оперативного регулирования с помощью электроприводов. Первая часть магнитного канала имеет независимое регулирование радиальных координат входа и выхода, у третьей части регулируется положение выходной точки при фиксированной входной точке. Для второй части магнитного канала кроме независимого регулирования радиальных координат входа и выхода предусмотрено перемещение по азимуту в пределах 11° , что соответствует 600 мм линейного перемещения.

Обдирочное устройство стандартной конструкции в циклотроне Ц-250 неприменимо: оно должно быть установлено в зазоре между секторами (30 мм) и должно перемещаться на расстояние более 1000 мм по сложной траектории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени практически решены проблемы размещения оборудования в вакуумной камере циклотрона. Разработаны компьютерная модель электромагнита, документация на магнитопровод, ускоряющую систему, основные и корректирующие катушки. Начато изготовление основных узлов и систем данного циклотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smirnov K. E., Gavrish Yu. N., Galchuck A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Klopenkov R. M., Korolev L. E., Kravchuck K. A., Kuzhlev A. N., Mezhev I. I., Mudrolyubov V. G., Osina Yu. K., Stogov Yu. I., Usanova M. V. Cyclotron System C-250 // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2021. P. 105–107.

Получено 18 ноября 2022 г.