

## СОВРЕМЕННЫЕ ЦИКЛОТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ НИИЭФА

*А. В. Ванин, Ю. Н. Гавриш<sup>1</sup>*

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В АО «НИИЭФА» разработан ряд циклотронов и комплексов на их основе, обеспечивающих генерацию и использование ускоренных пучков протонов в диапазоне значений энергии от 1 до 80 МэВ. В некоторых моделях циклотронов предусмотрено получение ускоренных пучков дейтронов. Комплексы, размещаемые в медицинских центрах, оснащаются мишенными устройствами для производства радионуклидов в газообразной, жидкой и твердотельной фазах.

A series of cyclotrons and cyclotron systems for generation of accelerated proton beams with energies from 1 up to 80 MeV has been designed, manufactured in the JSC “NIIEFA” and successfully put into operation. Some models of cyclotrons provide for production of accelerated deuteron beams. Cyclotron systems intended for operation in medical centers are equipped with water, gaseous and solid target devices.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

В АО «НИИЭФА» разработан ряд циклотронов, реализующих ускорение отрицательных ионов водорода и дейтерия с выпуском пучков ускоренных протонов и дейтронов за счет перезарядки на тонких графитовых фольгах. Основные характеристики циклотронов представлены в таблице.

Циклотрон	Энергия, МэВ ( $p/d$ )	Ток, мкА	Дополнительное оборудование комплекса
СС-1-3	1–3	20	Анализатор: $\Delta E/E < 10^{-3}$
СС-12	12	100	Мишенный комплекс для наработки УКЖ- (С-11, N-13, O-15 и F-18) нуклидов
СС-18/9	18/9	100/50	Мишенный комплекс: УКЖ- и КЖ- (Rb-81, I-123, In-111, Tl-201, Ga-67, Y-87 и др.) нуклиды
СС-18/9М	12–18/6–9	150/50	Мишенный комплекс: УКЖ- и КЖ- (Rb-81, I-123, In-111, Tl-201, Ga-67, Y-87 и др.) нуклиды
МСС-30/15	18–30/9–15	100/50	Мишенный комплекс: УКЖ-, КЖ- и ДЖ- (Na-22, Co-57, Cd-109, Ce-139) нуклиды
Ц-80	40–80	100	Тракт формирования пучка для протонной терапии

---

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

Управление работой циклотронов и циклотронных комплексов полностью автоматизировано. САУ имеют архитектуру распределенного типа и состоят из контроллеров и компьютеров, каждый из которых отвечает за управление одной или несколькими системами циклотронного комплекса.

## 1. ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Циклотронный комплекс СС-1-3 [1, 2] обеспечивает получение пучков протонов с уникальными параметрами (диапазон значений энергии от 1 до 3 МэВ при ширине спектра не более 0,1% и точности установления энергии не хуже 1 кэВ), предназначен для проведения аналитических исследований на основе рентгеноспектрального и гамма-спектрального методов, а также метода обратного резерфордовского рассеяния.

Для реализации указанных параметров пучка выбран вариант построения комплекса, включающего в себя компактный циклотрон и систему формирования и транспортировки пучка (рис. 1). Электромагнит циклотрона имеет магнитопровод броневых типа, являющийся одновременно вакуумной камерой, медианная плоскость расположена горизонтально. Резонансная ускоряющая система размещена в объеме вакуумной камеры. Система внешней инъекции отрицательных ионов водорода расположена под электромагнитом. Выпуск ускоренного пучка протонов осуществляется за счет использования обдирочного устройства, оснащенного тремя графитовыми фольгами.

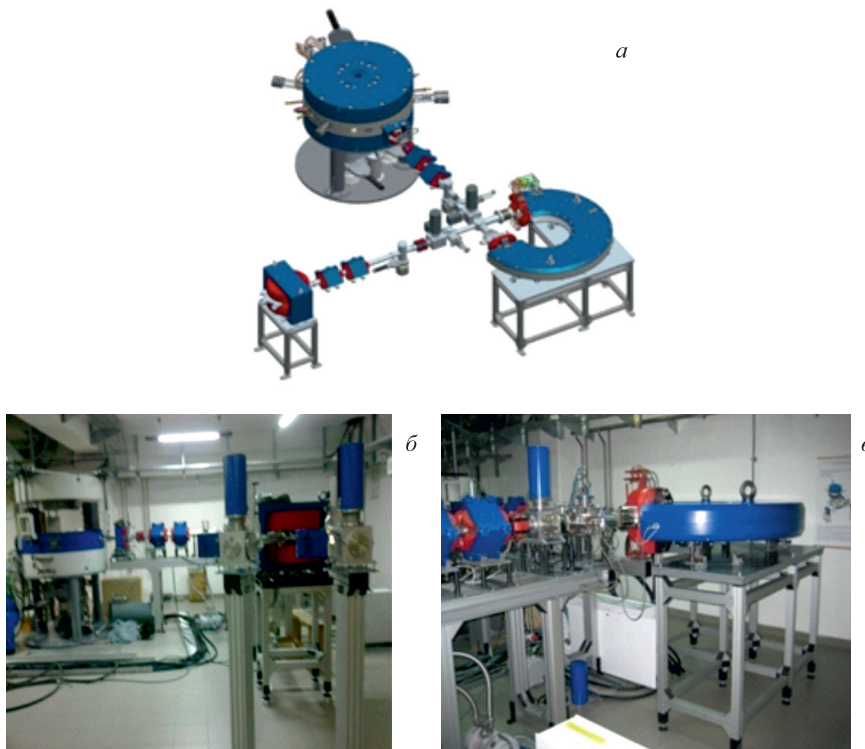


Рис. 1. Циклотронный комплекс СС-1-3 с трактом формирования и транспортировки пучка

Система формирования и транспортировки обеспечивает нестандартные для циклотронов параметры пучка протонов по ширине спектра и точности установления энергии. В систему входят согласующий, коммутирующий и корректирующие электромагниты, два дублета квадрупольных линз. Главный узел системы — магнитный анализатор, включающий в себя электромагнит с углом поворота  $270^\circ$  и два коллиматора, установленных на входе и выходе вакуумной камеры электромагнита.

Оборудование циклотронного комплекса смонтировано и налажено в институте «Винча» (Белград). Реализован выпуск пучка протонов из циклотрона и проводка пучка по тракту формирования. Испытания комплекса проведены при трех согласованных значениях энергии протонов: 1, 1,7 и 2,9 МэВ. Циклотронный комплекс с параметрами, не имеющими аналогов, находится в рабочем состоянии.

## 2. ЦИКЛОТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ЦЕНТРОВ

Циклотроны СС-12, СС-18/9, СС-18/9М, МСС-30/15 [3–6] предназначены для наработки радионуклидов непосредственно в медицинских учреждениях. Отличия в параметрах ускоренных пучков определяют целесообразность применения той или иной модели в конкретных условиях.

В этих четырех моделях циклотронов применено несколько общих технических решений, отличающих их от циклотронов других фирм. Основной электромагнит броневое исполнения имеет вертикальное расположение медианной плоскости, что обеспечивает удобный доступ к устройствам, расположенным в вакуумной камере, путем отодвигания подвижной части электромагнита по направляющим. Ускорение ионов водорода и дейтерия осуществляется на фиксированной частоте с использованием второй и четвертой гармоник частоты обращения. Радиальное распределение среднего магнитного поля при изменении типа ускоряемых ионов корректируется без дополнительных обмоток за счет оперативного перемещения специальных шиммов. Обеспечен одновременный выпуск двух пучков ускоренных ионов. Циклотроны оснащены системами внешней инъекции отрицательных ионов и системами транспортировки выпущенных пучков (рис. 2, 3).

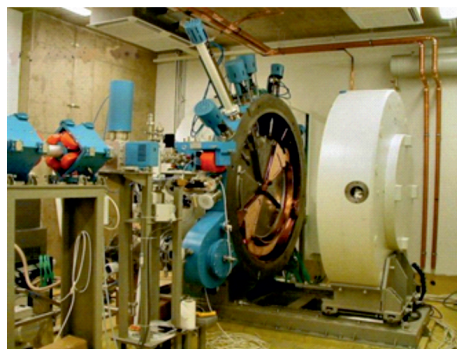


Рис. 2. Циклотрон СС-18/9 с открытой вакуумной камерой



Рис. 3. Циклотрон СС-18/9М с удаленными мишенями

Циклотрон СС-18/9М оснащен мишенным комплексом для производства радионуклидов в газообразной и жидкой фазах, разработанным и изготовленным также АО «НИИЭФА» [7]. Мишени могут устанавливаться как на патрубках системы транспортировки, так и непосредственно на выпускных патрубках электромагнита. Мишенный комплекс и его обеспечивающие системы интегрированы в общую систему управления циклотронным комплексом. Возможна независимая поставка мишенного комплекса (или отдельных мишеней) для ранее введенных в эксплуатацию циклотронов АО «НИИЭФА» или других фирм. К настоящему времени разработано роботизированное устройство, обеспечивающее оперативную смену мишеней.

### 3. ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС Ц-80

Циклотронный комплекс Ц-80, предназначенный для получения протонных пучков с энергией в диапазоне 40–80 МэВ и током не менее 100 мкА, разработан, изготовлен и поставлен в ПИЯФ им. Б. П. Константинова [8, 9]. Пучки с такими параметрами позволяют реализовать целый ряд научно-исследовательских и коммерческих проектов:

- отработку технологии получения широкого спектра изотопов медицинского назначения, в том числе генераторов излучения;
- производство изотопов в коммерческих масштабах;
- организацию протонной терапии офтальмологических заболеваний;
- ресурсные исследования радиационной стойкости радиоэлектронных изделий с использованием интенсивных пучков протонов и нейтронов;
- экспериментальные исследования в области ядерной физики и радиационного материаловедения.

Принципиальной особенностью проекта является использование в качестве основного электромагнита существовавшей в ПИЯФ модели электромагнита действующего синхроциклотрона. Это решение позволило сократить расходы, но ограничило выбор технических решений при разработке конструкции циклотрона:

- заданы габариты вакуумной камеры и, отчасти, количество и расположение навесных устройств;
- заданы параметры источников системы электропитания магнита;
- практически заданы габариты резонансной системы;
- система внешней инжекции отрицательных ионов водорода размещена в подвальном помещении непосредственно под электромагнитом;
- вывод пучков ускоренных протонов осуществляется через один выводной патрубок с помощью перемещаемого в нужное положение обдирочного устройства;
- диапазон регулирования энергии выводимых из циклотрона протонов ограничивается взаимным положением обдирочного устройства и резонансной системы;
- для повышения максимальной энергии ускоренных ионов заново спроектированы и изготовлены полюсные наконечники с секторами высокой спиральности.

Оборудование циклотронного комплекса смонтировано в экспериментальном зале корпуса 2 и его подвальном помещении. На первом этаже располагается оборудование циклотрона и первого участка системы транспортировки, в подвальном помещении — система внешней инжекции циклотрона, высокочастотный генератор и система транспортировки пучка с разводкой на три приемных мишени (рис. 4). В дальнейшем на пер-

вом этаже будет установлено оборудование тракта формирования гомогенного пучка для терапии офтальмологических заболеваний.

В июне 2016 г. произведен физический пуск комплекса. Реализован вывод пучков ускоренных протонов в диапазоне значений энергии 40–79 МэВ, в диапазоне 40–60 МэВ подтверждено получение проектного тока. Пучок с согласованной энергией протонов 50 МэВ проведен до конечного цилиндра Фарадея (расстояние  $\sim 35$  м) при интегральных потерях интенсивности 12%. Физический пуск и испытания осуществлялись в автоматизированном режиме управления и контроля всех систем циклотронного ком-

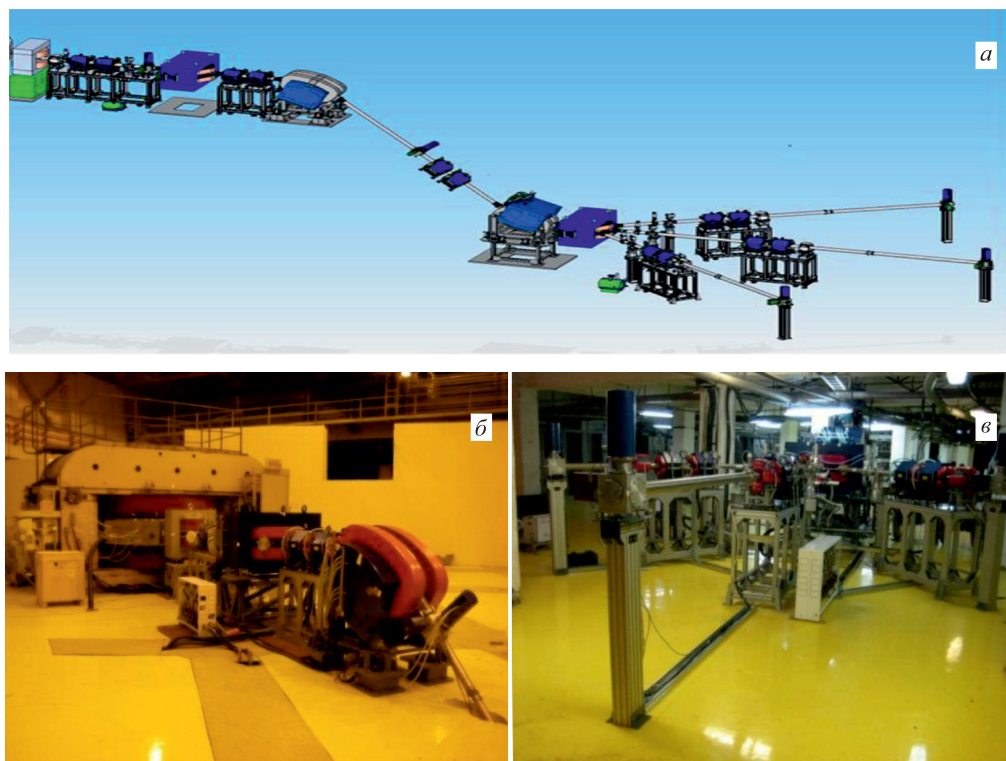


Рис. 4. Схема расстановки (а) и оборудование (б, в) циклотронного комплекса Ц-80

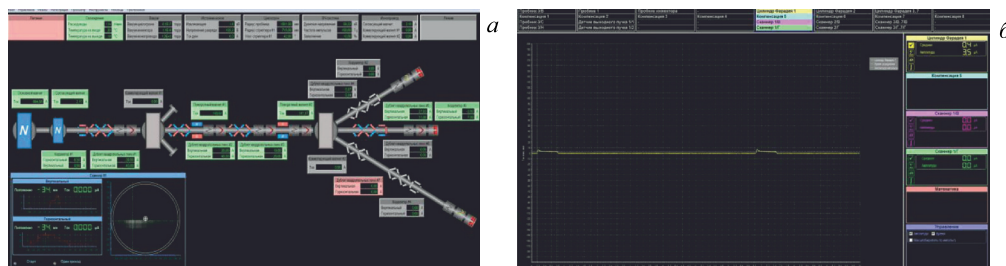


Рис. 5. Отображение параметров системы транспортировки (а) и ускоренного пучка (б)

плекса. На рис. 5 для примера представлена информация о состоянии и параметрах узлов системы транспортировки в процессе проведения работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный и реализованный АО «НИИЭФА» ряд современных циклотронов и комплексов на их основе обеспечивает генерацию ускоренных пучков протонов в диапазоне значений энергии от 1 до 80 МэВ. Конкретные модели циклотронных комплексов могут использоваться как для проведения исследований в различных областях науки и техники, так и для коммерческой наработки радионуклидной продукции. Принципиальной особенностью НИИЭФА является обеспечение полного цикла существования производимой продукции: разработки, изготовления, ввода в эксплуатацию, гарантийного и постгарантийного обслуживания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vasilchenko I. N. et al.* The CC-1-3 Cyclotron System // Proc. of RuPAC-2012, St. Petersburg, Russia, 2012. P. 191–193.
2. *Antonov A. V. et al.* The CC-1-3 Cyclotron System. Installation and Test Results // Proc. of RuPAC'2016. P. 182–184.
3. *Богданов П. В. и др.* Разработка конструкции циклотрона СС-12 // ВАНТ. Сер. «Электрофизическая аппаратура». Санкт-Петербург, 2010. Вып. 5(31). С. 11–20.
4. *Богданов П. В. и др.* Разработка и реализация проекта циклотрона СС-18/9 // Там же. С. 21–32.
5. *Богданов П. В. и др.* Медицинский компактный циклотрон МСС-30/15 с регулируемой энергией ускоренных ионов // Там же. С. 32–43.
6. *Вересов О. Л. и др.* Циклотронный комплекс СС-18/9М для наработки радиоизотопной продукции с целью получения диагностических РФП для ПЭТ-диагностики // ВАНТ. Сер. «Техн. физика и автоматизация». М.: АО «НИИЭФА», 2015. Вып. 70. С. 68–74.
7. *Abramov E. N. et al.* System for Remote Target Replacement of the Target System for the CC-Series Cyclotrons // Proc. of RuPAC'2014. P. 415–416.
8. *Богданов П. В. и др.* Основные технические характеристики циклотронного комплекса Ц-80 // Проблемы атом. науки и технологии (ВАНТ, Украина). Сер. «Ядерно-физ. исслед.» (58). 2012. Вып. 3(79). С. 10–14.
9. *Gavriash Yu. N. et al.* Physical Start-up of the C-80 Isochronous Cyclotron // Proc. of RuPAC'2016. P. 179–181.