

## МЕДИЦИНСКИЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЦИКЛОТРОН МСЦ-230. СТАТУС ПРОЕКТА

*П. Г. Акишин<sup>а</sup>, В. А. Весенков<sup>а</sup>, А. И. Власов<sup>а</sup>, Ю. Н. Гавриш<sup>б</sup>,  
В. А. Герасимов<sup>а</sup>, О. М. Голубицкий<sup>а</sup>, С. В. Гурский<sup>а</sup>,  
О. В. Карамышев<sup>а</sup>, Г. А. Карамышева<sup>а</sup>, И. Д. Ляпин<sup>а</sup>,  
В. А. Малинин<sup>а</sup>, В. Г. Мудролюбов<sup>б</sup>, Д. Н. Никифоров<sup>а</sup>,  
Ю. К. Осина<sup>б</sup>, А. А. Павлова<sup>а</sup>, И. М. Пальников<sup>а</sup>, Р. В. Пивин<sup>а</sup>,  
Д. В. Попов<sup>а</sup>, В. М. Романов<sup>а</sup>, А. А. Сеница<sup>а</sup>, К. Е. Смирнов<sup>б</sup>,  
Г. В. Трубников<sup>а</sup>, С. Б. Федоренко<sup>а</sup>, Г. Г. Ходжибагиян<sup>а</sup>,  
С. Г. Ширков<sup>а</sup>, С. Л. Яковенко<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>б</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

В Объединенном институте ядерных исследований совместно с АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» ведутся работы по созданию медицинского сверхпроводящего циклотрона МСЦ-230. Сделаны расчеты магнитного поля, резонансной системы, распределения вакуума в ускорительной камере и динамики пучка протонов. Осуществляется проектирование узлов и систем циклотрона. Начато изготовление отдельных узлов ускорителя. Представлены описание циклотрона МСЦ-230, его основные параметры и статус работ по реализации проекта.

The medical superconducting cyclotron MSC-230 is under construction at the Joint Institute for Nuclear Research and JSC NIIIEFA. The parameters of the magnetic field and the resonance system as well as dynamics of the proton beam were simulated. The development of the cyclotron structure is in progress. The manufacture of the cyclotron's units was started. The description of the MSC-230, its parameters and status of the project are presented.

PACS: 29.20.dg

### ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящий изохронный циклотрон МСЦ-230 предназначен для проведения протонной лучевой терапии и медико-биологических исследований. Ускоритель рассчитан на работу в непрерывном и импульсном режимах с максимальной энергией протонного пучка 230 МэВ и максимальным током до 10 мкА [1]. Характеристики циклотрона позволят проводить различные эксперименты в области протонной терапии, в том числе по изучению флэш-эффекта.

Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230 — изохронный компактный циклотрон весом 130 т. Высота ярма 1900 мм, диаметр 3860 мм. Сверхпроводящие

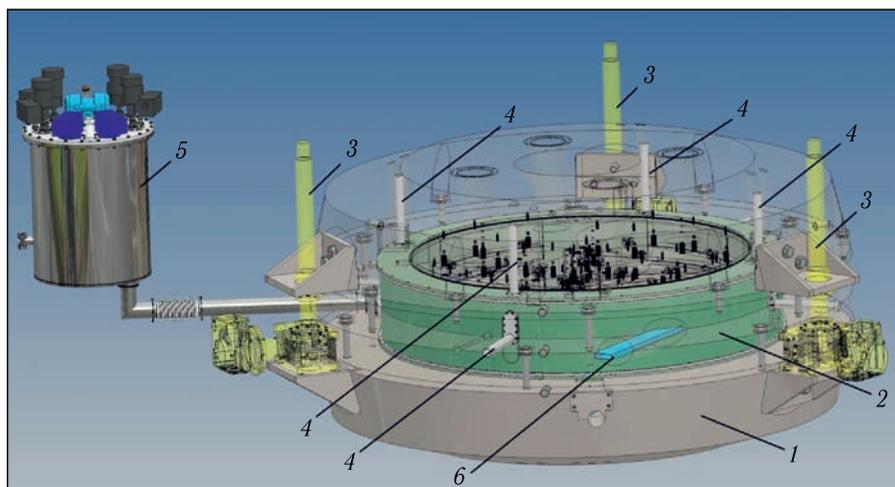


Рис. 1. Общий вид МСЦ-230: 1 — ярмо электромагнита; 2 — криостат для размещения сверхпроводящих катушек; 3 — система подъема верхней части ярма; 4 — система поддержки криогенных катушек; 5 — гелиевый рефрижератор; 6 — вывод протонного пучка

Таблица 1. Основные параметры МСЦ-230

Параметр	Значение
Энергия протонов, МэВ	230
Ток пучка (непрерывный режим), мкА	1
Ток пучка (импульсный режим), мкА	10
Длительность импульса, мс	10–100
Длительность фронта импульса, мс	$\leq 1$
Нестабильность тока, %	$\pm 5$
Среднее магнитное поле ( $R_0/R_{\text{вывода}}$ ), Тл	1,7/2,15
Габариты (высота $\times$ диаметр), мм	1900 $\times$ 3860
Масса ярма, т	130
Ток в обмотке возбуждения (на одну катушку), ампер-витки	281 000
Частота ускорения, МГц	106,5
Число гармоник	4
Потребляемая мощность резонансной системы, кВт	60

катушки размещаются в криостате. В качестве ускорительной вакуумной камеры в МСЦ-230 используется область внутри ярма электромагнита и стенки криостата (рис. 1) [2]. Основные параметры циклотрона приведены в табл. 1.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Электромагнит циклотрона состоит из сверхпроводящих катушек [3] и «тепло-го» ярма, обеспечивающего величину магнитного поля 1,7 Тл в центральной области и 2,15 Тл в области вывода пучка. Ярмо составляют четыре пары секторов и ярмо броневого типа из четырех частей (рис. 2). В криостат входит вакуумный кожух

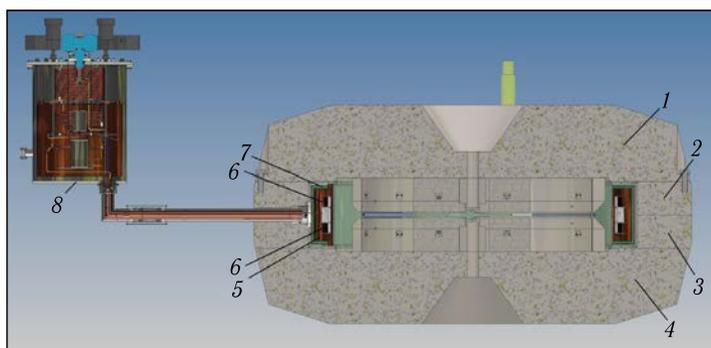


Рис. 2. Электромагнит циклотрона: 1 — верхняя часть ярма; 2 — верхнее кольцо ярма; 3 — нижнее кольцо ярма; 4 — нижняя часть ярма; 5 — тепловой экран соленоида; 6 — криогенные катушки соленоида; 7 — вакуумный кожух криостата; 8 — гелиевый рефрижератор



Рис. 3. Сборка гелиевого рефрижератора

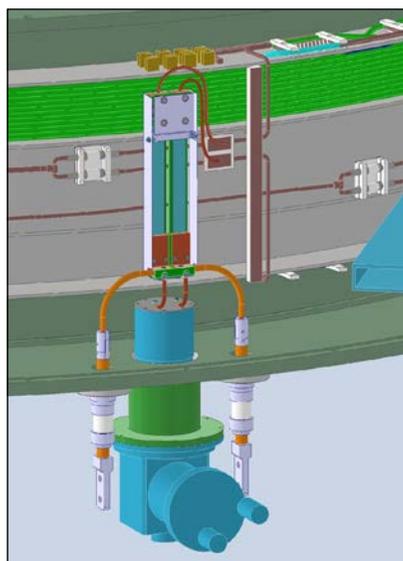


Рис. 4. Схема ввода тока в соленоид

Таблица 2. Параметры криогенной системы

Параметр	Значение
Внутренний диаметр катушки, м	2,56
Внешний диаметр катушки, м	2,67
Число катушек, составляющих соленоид	2
Расстояние между катушками (зазор), м	0,13
Высота, м	0,35
Запасенная энергия при максимальном токе, МДж	3,85
Индуктивность соленоида, Гн	28,4
Объем жидкого гелия в соленоиде, л	7
Материал обмотки	Cu + Nb-Ti
Давление в изоляционном вакуумном объеме, Па	$\leq 1 \cdot 10^{-3}$
Изоляционный вакуумный объем	Отделен от пучковой камеры

и тепловой экран. Сверхпроводящие катушки, размещенные в криостате, охлаждаются потоком гелия сверхкритического давления, производимым гелиевым рефрижератором, который прокачивается внутри охлаждающего канала кабеля. Тепловой экран соленоида охлаждается четырьмя криокулерами, а также потоком кипящего азота, пары которого конденсируются в гелиевом рефрижераторе. Жидкий азот стекает из рефрижератора к теплому экрану по сифону для подачи и возврата в рефрижератор жидких гелия и азота. Сифон имеет изоляционный вакуумный объем, тепловой экран, охлаждаемый парами азота, и многослойную экранно-вакуумную изоляцию (рис. 2, 3). Усилия, действующие на сверхпроводящие катушки, воспринимаются 12 подвесами (из них 8 вертикальных и 4 радиальных) (см. рис. 1). Ввод тока в криостат осуществляется с помощью одной пары ВТСП-тоководов, охлаждаемых криокулером (рис. 4). Параметры криогенной системы представлены в табл. 2.

## РЕЗОНАНСНАЯ СИСТЕМА

Резонансная ускоряющая система состоит из четырех контуров с распределенными параметрами, полностью размещенных в долинах электромагнита (рис. 5). Система ВЧ-питания позволяет генерировать мощность до величины 100 кВт на частоте

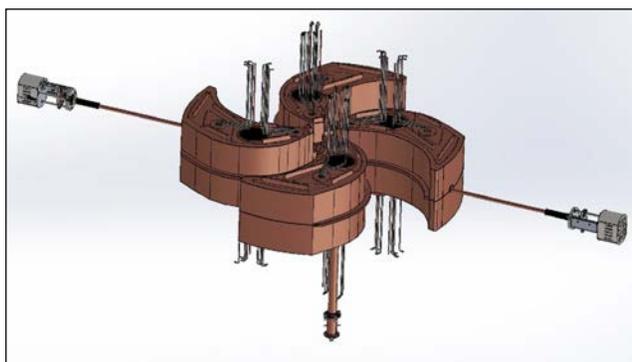


Рис. 5. Модель резонансной системы

Таблица 3. Параметры резонансной системы

Параметр	Значение
Гармоника ускорения	4
Основная частота ВЧ-поля, МГц	106,5
Количество дуантов	4
Количество штоков в полурезонаторе	2
Количество генераторов	1
Напряжение на дуантах, кВ	30–80
Расчетная рассеиваемая ВЧ-мощность, кВт	60
Расчетная добротность ускоряющей системы	11 200

106,5 МГц, обеспечивая передачу ВЧ-мощности в резонансную систему по коаксиальному фидеру, стабилизирует частоту и амплитуду ускоряющего поля. Параметры резонансной системы приведены в табл. 3.

### ИСТОЧНИК ПРОТОНОВ

В циклотроне МСЦ-230 будет использоваться внутренний источник типа Пеннинга с катодом прямого накала (рис. 6). Конструкция источника протонов, включая систему шлюзования, позволяет осуществлять перемещение ионного источника при замене катода без разгерметизации ускоряющего объема ускорителя.



Рис. 6. Сборка узла источника протонов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты характеристик электромагнита, резонансной системы, динамики пучка протонов в зоне ускорения и вывода циклотрона. Ведется техническое проектирование систем циклотрона. Завершено проектирование и изготовление гелиевого рефрижератора. Начато изготовление ярма циклотрона. Завершается подготовка инфраструктуры для проведения криогенных испытаний сверхпроводящего соленоида.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карамышев О. В. и др.* Исследования и разработка сверхпроводящего циклотрона SC230 для протонной терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 1(233). С. 73–85.
2. *Яковенко С. Л. и др.* Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230. Статус проекта // Материалы XXVIII Рос. конф. по ускорителям заряженных частиц (RuPAC'23), Новосибирск, Россия, 2023.
3. *Khodzhbagiyan H. G. et al.* Solenoid for Spin Physics Detector at NICA from the Nuclotron-Type Superconductor Cable // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 4. P. 397–401.

Получено 28 октября 2024 г.