

Научная статья

УДК 616-71/-78

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-16-22

Модель магнито-оптической структуры протонного синхротрона комплекса протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт»*

**Алексей Николаевич Черных¹, Михаил Сергеевич Булатов²
Дмитрий Алексеевич Жидков³, Геннадий Иванович Кленов⁴
Геннадий Николаевич Кропачев⁵, Тимур Вячеславович Кулевой⁶
Владимир Петрович Ларионов⁷, Алексей Леонидович Ситников⁸**

НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

¹Chernykh_AN@nrcki.ru

²Bulatow_MS@nrcki.ru

³Zhidkov_DA@nrcki.ru

⁴Klenov_GI@nrcki.ru

⁵Kropachev@itep.ru

⁶Kulevoy@itep.ru

⁷Larionov_VP@nrcki.ru

⁸Sitnikov@itep.ru

Аннотация

В рамках реализации Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (далее – НИЦ «Курчатовский институт») создается новейший научно-образовательный медицинский центр ядерной медицины (НОМЦ ЯМ). В задачу сооружения НОМЦ ЯМ также входит строительство центра протонной лучевой терапии, который должен стать базой долговременных многолетних разработок оборудования и технологий протонной лучевой терапии новых поколений, их внедрения в практическое здравоохранение путем тиражирования в субъектах Российской Федерации и дружественных странах, а также подготовки кадров (медицинских физиков и клиницистов). В статье представлены результаты эскизного проектирования ускорительного оборудования для создаваемого комплекса протонной лучевой терапии, который реализуется на базе протонного синхротрона.

Ключевые слова

протонная лучевая терапия, ускорители, синхротрон, линейный ускоритель протонов

Для цитирования

Черных А. Н., Булатов М. С., Жидков Д. А., Кленов Г. И., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ларионов В. П., Ситников А. Л. Модель магнито-оптической структуры протонного синхротрона комплекса протонной лучевой терапии НИЦ «Курчатовский институт» // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 16–22. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-16-22

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Model of the Magneto-Optical Structure of a Proton Synchrotron for the Proton Beam Therapy Complex NRC “Kurchatov Institute”

Alexey N. Chernykh¹, Michael S. Bulatov², Dmitriy A. Zhidkov³
Gennady I. Klenov⁴, Gennady N. Kropachev⁵, Timur V. Kulevoy⁶
Vladimir P. Larionov⁷, Alexey L. Sitnikov⁸

NRC “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russia

¹Chernykh_AN@nrcki.ru

²Bulatov_MS@nrcki.ru

³Zhidkov_DA@nrcki.ru

⁴Klenov_GI@nrcki.ru

⁵Kropachev@itep.ru

⁶Kulevoy@itep.ru

⁷Larionov_VP@nrcki.ru

⁸Sitnikov@itep.ru

Abstract

As part of the implementation of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Synchrotron and Neutron Research and Research Infrastructure for 2019–2027, a scientific and educational medical nuclear medicine center (SEMC NM). The task of constructing the SEMC NM also includes the construction of a proton beam therapy center, which should become the basis for long-term development of equipment and technologies for new generations of proton beam therapy, their implementation in practical healthcare by replicating in the constituent entities of the Russian Federation and friendly countries, as well as training personnel (medical physicists and clinicians). The article presents the results of preliminary design of the accelerator equipment for the created proton beam therapy complex, which is implemented on the basis of the proton synchrotron.

Keywords

proton beam therapy, accelerators, synchrotron, linear proton accelerator

For citation

Chernykh A. N., Bulatov M. S., Zhidkov D. A., Klenov G. I., Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Larionov V. P., Sitnikov A. L. Model of the magneto-optical structure of a proton synchrotron for the proton beam therapy complex NRC “Kurchatov Institute”. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 16–22 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-16-22

Введение

Правительство РФ в марте 2020 г. утвердило Федеральную научно-техническую программу развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. (ФНТП). В соответствии с Указом НИЦ «Курчатовский институт» был определен головной научной организацией Программы¹.

Программа предусматривает создание новейшего научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины, в состав которого входит несколько комплексов адронной лучевой терапии. Одним из таких комплексов является Комплекс протонной лучевой терапии (ПЛТ), создаваемый на территории НИЦ «Курчатовский институт» как база для долговременных многолетних разработок новых поколений оборудования и технологий ПЛТ, подготовки кадров (медицинских физиков и клиницистов), проведения клинических исследований и лечения ограниченного контингента онкологических пациентов, а также внедрения технологий в прак-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.03.2020 г. № 287. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202003260022?ysclid=lku5ho2vfh319276837> (дата обращения: 02.08.2023).

тическое здравоохранение путем тиражирования в субъектах Российской Федерации и дружественных странах.

Комплекс протонной лучевой терапии будет реализован на базе протонного синхротрона после ускорения, в котором до требуемой энергии в диапазоне от 70 до 250 МэВ протонный пучок будет доставляться к двум процедурным кабинетам. Один кабинет с системой поворота протонного пучка – гантри [1] и один – с фиксированным в горизонтальной плоскости направлением протонного пучка (рис. 1).

В рамках реализации проекта ведется проработка ускорительного оборудования – ионного источника протонов, инжектора – линейного ускорителя, синхротрона и каналов транспортировки к процедурным кабинетам.

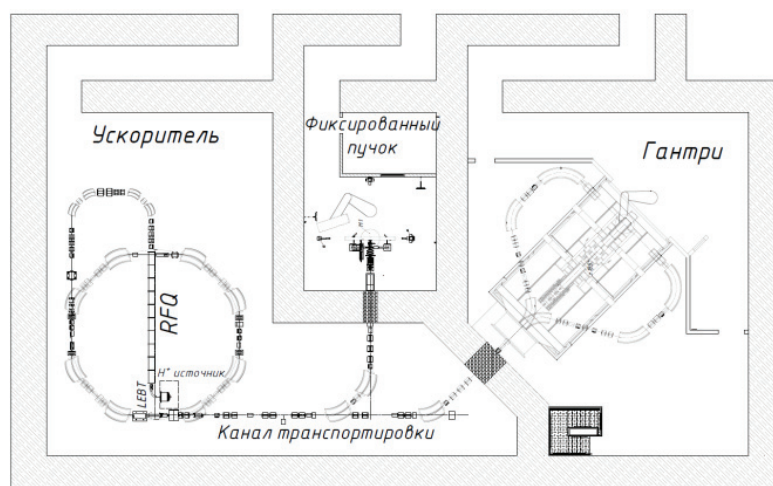


Рис. 1. Схема компоновки ускорительного оборудования Комплекса протонной лучевой терапии
Fig. 1. Layout diagram of the accelerator equipment of the proton radiation therapy complex

1. Проект синхротрона

Сильнофокусирующая структура кольца выполнена по схеме с разделенными функциями, включающей магниты с однородным полем и краевой фокусировкой, а также фокусирующую систему из квадрупольных магнитов (рис. 2). По результатам проведенного исследования определены основные параметры синхротрона (табл. 1).

На диаграмме частот предварительно выбрана рабочая точка с частотами $Q_x = 2,69$ и $Q_z = 1,45$, находящаяся вблизи линии резонанса третьего порядка $Q_x = 2,666 = 8/3$ или $3Q_x = 8$. Такой выбор связан с отсутствием в этой области связи с Q_z .

На кольце с периметром 30,3 м установлено восемь 45-градусных дипольных магнитов Н-образного типа, радиус поворота выбран 1,62 м. Для обеспечения краевой фокусировки у дипольных магнитов на входе и выходе приняты угловые скосы $\phi = (+37,9)$ градуса.

Магнитная структура кольца содержит четыре ахроматичных 90-градусных поворота, в каждый из которых входит два ближайших соседних 45-градусных магнита и размещенный посередине между ними фокусирующий магнитный квадруполь. Промежуток между магнитами имеет длину 1,2 м. Во всех четырех больших промежутках (два из которых имеют длину 3 м, а два – 2,7 м) линейная и угловая компоненты дисперсии как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях равны нулю.

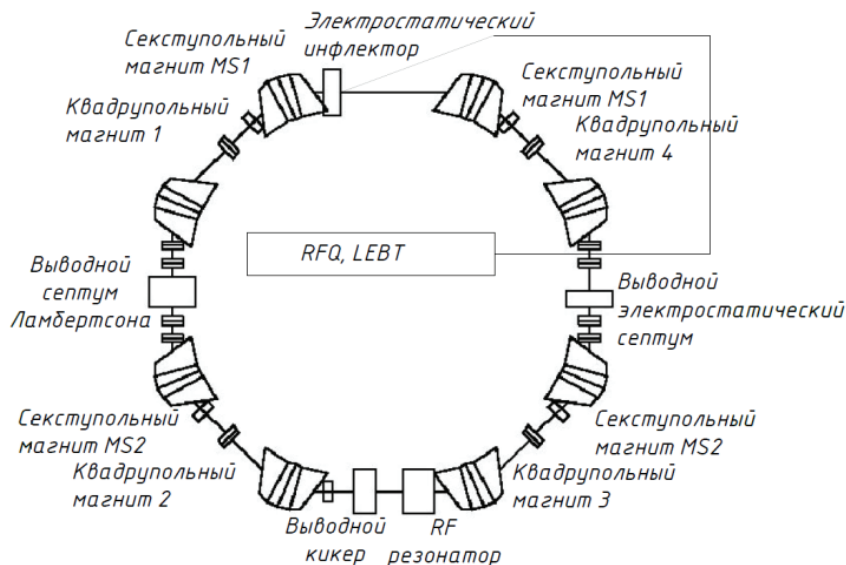


Рис. 2. Магнито-оптическая структура синхротрона
Fig. 2. Magneto-optical structure of the synchrotron

Таблица 1

Основные параметры протонного синхротрона

Параметр	Значение
Частицы	Протоны
Энергия инжекции	5 МэВ
Энергия вывода	70–250 МэВ
Длина орбиты	30,3 м
Число поворотных магнитов	8
Нормализованный эмиттанс	1 π мм-мрад
Частота бетатронных колебаний в рабочей точке	2,69 (горизонт.)/1,45 (вертик.)
Вывод	Медленный: секступольный резонанс Быстрый: 10 мс
Частота циклов ускорений	$\sim 0,7$ Гц

В каждом из выводных 2,7-метровых промежутках расположены четыре квадрупольные линзы полярностью DFFD, предназначенные для формирования в этом промежутке большой горизонтальной амплитудной функции $\beta_x \cong 90,2$ м, необходимой для облегчения вывода пучка (рис. 3).

2. Магнито-оптическая структура

На рис. 3 представлены результаты анализа кольца по программе WinAgile [2]. Начало линейной развертки кольца (с обходом против часовой) соответствует месту инжекции пучка в середину 3-метрового промежутка с помощью электростатического инфлектора. Для инжектируемого пучка при $W_k = 5$ МэВ геометрический эмиттанс (произведение полуосей) $\epsilon_x = \epsilon_z = 10$ мм мрад и $\Delta P/P = 0,002$, В местах 90-градусных поворотов также размещены секступольные линзы для регулировки хроматичности магнитной системы.

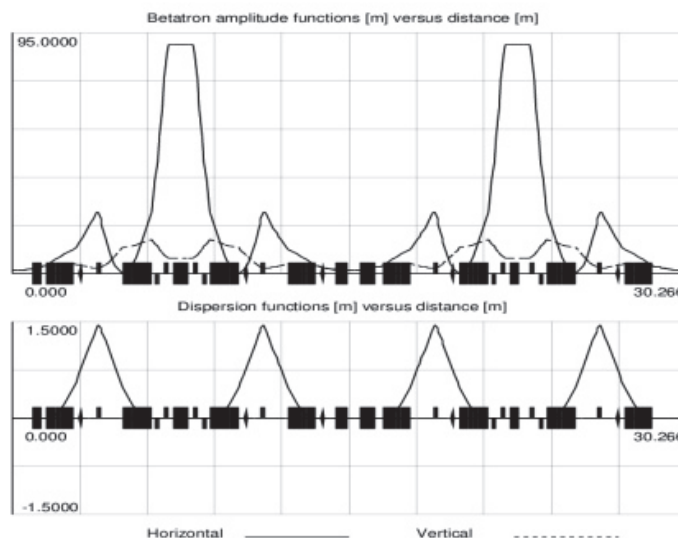


Рис. 3. Twiss-параметры структуры кольца
Fig. 3. Twiss parameters of the ring structure

Максимальное значение дисперсии в области 90-градусного поворота составляет $D_x \cong 1,5$ м. В следующем 2,7-метровом промежутке кроме 4-квадрупольных линз расположен септум Ламбертсона для вывода пучка по вертикали. В следующем 3-метровом промежутке расположены: секступольная линза для возбуждения резонанса 3-го порядка, выводной ВЧ-толкатель (RF-knock out) и ускоряющий ВЧ-резонатор. В следующем 2,7-метровом промежутке кроме 4-квадрупольных линз находится электростатический септум для вывода пучка по горизонтали.

3. Ввод и вывод протонного пучка

В качестве инжектора предлагается импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 5 МэВ, резонансной частотой 162,5 МГц и током 30 мА (табл. 2). При токе инжекции 30 мА и нормализованном эмиттансе $0,75 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ транспорт в канале RFQ составляет 99,7 %, а трансмиссия – 99,3 %. При этом разброс по импульсам $\Delta p/p$ на выходе RFQ для 90 % частиц не превышает $\pm 0,6$ %. Рост поперечного эмиттанса составляет 1,2 (эмиттанс содержит 90 % пучка). Отметим, что значение транспорта и трансмиссии ожидается не меньше 95 % в широком диапазоне изменения входного эмиттанса. Таким образом, разрабатываемый канал RFQ удовлетворяет основным требованиям, представленным в табл. 2.

В разрабатываемом протонном синхротроне предполагается применить две системы вывода, рассчитанные на диапазон энергий (70 ÷ 250) МэВ: медленный вывод пучка, длительностью до 1 секунды и быстрый вывод за 10 мс.

Для реализации систем вывода в магнито-оптической структуре синхротрона предусмотрены электростатический септум, септум магнит Ламбертсона и выводной ВЧ-толкатель (RF-knock out).

Таблица 2

Основные параметры RFQ

Параметр	Значение
Частота ускоряющего поля, МГц	162,5
Ускоряемые частицы	H ⁺
Ток инжекции, мА	30
Напряжение инжекции, кВ	45
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов (по критерию Килпатрика)	1,8 Кр
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, кВ/см	250
Энергия частиц, МэВ	0,045 ÷ 5,0
Нормализованный эмиттанс пучка, π·мм·мрад	0,75
Нормализованный аксептанс канала, π мм мрад	2,4
Отношение аксептанса канала к эмиттансу пучка	3
Синхронная фаза, град	−90 ÷ −35
Напряжение между смежными электродами, кВ	129
Средний радиус, мм	6,5
Радиус электрода, мм	5,2
Максимальный коэффициент модуляции	2,8
Длина ускорителя, мм	7002

Заключение

В статье представлены результаты предварительного исследования конструкции протонного медицинского синхротрона для центра ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт».

Кольцо выполнено по схеме с жесткой фокусировкой при $Qxz > 1$, за счет чего уменьшается амплитуда бетатронных колебаний по вертикали в дипольных магнитах, что в свою очередь призвано снизить апертуру, габариты и вес дипольного магнита. В нашем случае межполюсный зазор в дипольном магните равен 50 мм.

Амплитудные функции в кольце резко неоднородны; в выводных промежутках beta-x достигает 90,2 м, что облегчает конструктивное исполнение выводных септумов.

Частота бетатронных (поперечных) колебаний значительно превосходит круговую частоту, за счет чего устраняется связь с продольными колебаниями.

Хроматические секступоли MS1 и MS2, расположенные в промежутках с ненулевой дисперсией, позволяют регулировать хроматичности кольца по обоим направлениям в широком диапазоне: имеем $dQx/dp/p = -22,8$ и $dQz/dp/p = -6,2$ при нулевых градиентах секступолей и нулевые хроматичности при нормализованных градиентах MS1 = $-86,3 [1/m^3]$, MS2 = $+72,7 [1/m^3]$.

В ближайшем будущем мы будем изучать вопросы динамики пучка, включая инжекцию, ускорение и вывод, а также разрабатывать технический проект линейного ускорителя.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Сергунова К. А., Дьякова Ю. А., Черных А. Н. и др. Распределенный центр ядерной медицины НИЦ «Курчатовский институт»: история, современное состояние и перспективы развития // Кристаллография. 2022. Т. 5, № 67. С. 801–817.
2. Bryant P. J. Basic theory for magnetic measurements // CERN 92-05. Sept., 1992. P. 65–69.

References

1. Kovalchuk M. V., Naraikin O. S., Sergunova K. A., Dyakova Y. A., Chernykh A. N. et al. Distributed Center for Nuclear Medicine National Research Center “Kurchatov Institute”: history, current state and development prospects. *Crystallography*, 2022, vol. 5, no. 67, pp. 801–817.
2. Bryant P. J. Basic theory for magnetic measurements. *CERN 92-05*, Sept., 1992, pp. 65–69.

Сведения об авторах

Алексей Николаевич Черных, кандидат технических наук

Михаил Сергеевич Булатов, лаборант-исследователь

Дмитрий Алексеевич Жидков, научный сотрудник

Геннадий Иванович Кленов, доктор технических наук

Геннадий Николаевич Кропачев, кандидат физико-математических наук

Тимур Вячеславович Кулевой, доктор технических наук

Владимир Петрович Ларионов, кандидат технических наук

Алексей Леонидович Ситников, кандидат физико-математических наук

Information about the Authors

Aleksey N. Chernykh, PhD (Technical Sciences)

Mikhail S. Bulatov, Laboratory Researcher

Dmitry A. Zhidkov, Researcher

Gennady I. Klenov, Doctor of Technical Sciences

Gennady N. Kropachev, Leading Researcher

Timur V. Kulevoy, Doctor of Technical Sciences

Vladimir P. Larionov, Candidate of Technical Sciences

Alexey L. Sitnikov, Candidate of Physics and Mathematics Science

*Статья поступила в редакцию 20.09.2023;
одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 22.11.2023*

*The article was submitted 20.09.2023;
approved after reviewing 20.11.2023; accepted for publication 22.11.2023*