Апрель, 2020

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФАЗОТРОНА ЛЯП И РАЗРАБОТКА ЦИКЛОТРОНОВ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Руководители темы: Карамышева Г.А.

Яковенко С.Л.

Основные этапы темы:

1. Совершенствование фазотрона и трактов пучков.

Яковенко С.Л. Шакун Н.Г.

2. Разработка и совершенствование циклотронов для медицинских и прикладных применений.

Карамышева Г.А.

3. Разработка сверхпроводящего циклотрона для протонной терапии для ИФП (Хефей, КНР)

Ширков Г.Д.

4. Развитие циклотронного метода ускорения сильноточных пучков. Ворожцов С.Б.

1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФАЗОТРОНА И ТРАКТОВ ЕГО ПУЧКОВ.

Основной задачей темы 1102 являлось поддержание Фазотрона в рабочем состоянии и проведение модернизации ускорителя и трактов пучков. За период с 2013 по 2020 годы были выполнены следующие работы по модернизации Фазотрона и трактов пучков:

- Проведены работы по совершенствованию системы силового питания Фазотрона и трактов пучков. Разработаны и внедрены в работу прецизионные источники на базе инверторов СВАРОГ АРС -400, 630 для питания магнито-оптических элементов VIII тракта вместо энергоёмких мотор-генераторов;
- Внедрена автоматизированная система управления трактами проводки пучков (АСУ ТП) с усовершенствованием системы регулирования и стабилизации, заменой компьютерной техники и разработкой нового программного обеспечения;

- Произведена замена всех коммутационных аппаратов на современные (автоматические выключатели, контактора) в системах питания трактов проводки пучков;
- Разработаны и внедрены схемы питания систем экономичной и надежной индикации пультов и стоек управления Фазотроном;
- Проведена модернизация источника питания для корректировки положения медианной поверхности пучка протонов, ускоряемого внутри камеры Фазотрона.
- Проведена модернизация ускоряющей системы (дуант) ускорителя.

В результате проведенной модернизации экономия электроэнергии составила около 900 кВТ.

За период с 2016 по 2019 годы была обеспечена стабильная работа ускорителя в среднем 1000 часов в год. Из них на медицинские исследования тратилось 80%, на эксперименты ФАЗА, БУРАН - 13% и 7% времени на собственные нужды ускорителя. В 2020 год запланированное время работы Фазотрона 500 часов в год. В основном на проведение радиобиологических исследований.

2. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИКЛОТРОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Важными задачами темы являются развитие методов и программ для проектирования ускорителей циклотронного типа, а также применение методов для разработки и модификации конкретных циклотронов для медицинских и иных применений. Циклотроны, ускоряющие заряженные частицы до низких и средних энергий, являются основным инструментом для проведения исследований в области физики атомного ядра и ядерных реакций. При этом циклотроны зарекомендовали себя не менее значимо и для прикладных применений, в частности в радиационной медицине. Причем, широкое распространение получили как ускорители низкой энергии для наработки медицинских изотопов, так и циклотроны на среднюю энергию, достаточную для лечения онкологических больных.

Проектирование каждого ускорителя осуществляется на основе проведения исследования различных вариантов систем циклотрона и оптимизации структуры установки в целом. Расчеты динамики пучка требуют учета самых разных эффектов: диссоциации ионов в электромагнитном поле, потерь пучка в результате перезарядки на остаточном газе, эффектов пространственного заряда, в зависимости от типа разрабатываемого циклотрона. Для обеспечения всех требований к ускорителям необходим комплексный подход к разработке и проектированию циклотронов, так как изменение параметров одной системы циклотрона ведет за собой необходимость изменения других систем.

Результатом качественной разработки является ускоритель, имеющий:

- простой дизайн магнита, и остальных систем;
- низкую потребляемую мощность;
- высокое качество пучка;

• ограниченное число подстраиваемых параметров, порядка 5 (ток питания основного магнита, напряжение ВЧ системы и т.д.);

• непрерывный пучок (квазинепрерывный), гарантирующий контролируемость дозы при облучении пациентов;

• небольшие размеры.

Необходимо адаптировать методы расчета не только к каждому разрабатываемому ускорителю, но и при настройке и оптимизации параметров работающих установок, таких как циклотрон АИЦ– 144 (ИЯФ ПАН, Польша).

Циклотрон АИЦ-144 (ИЯФ ПАН, Польша)

Работа проводилась согласно протоколам о выполнении совместной научно–исследовательской работы, заключённым между ОИЯИ и ИЯФ ПАН.

В период с февраля 2011 по январь 2016 года на многоцелевом изохронном циклотроне АИЦ– 144 проводилась протонная терапия меланомы глаза. Всего, за указанный период было успешно пролечено 128 пациентов. Начиная с февраля 2016 года, в связи со вводом в строй нового изохронного циклотрона С–235, АИЦ–144 используется как резервный циклотрон для лечения меланомы глаза у пациентов. Каждые два месяца на АИЦ–144 регулярно проводится контроль качества выведенного пучка протонов. Кроме того, ускоритель используется для наработки радиоизотопов. В связи с этим, была поставлена задача добиться стабильного максимального значения коэффициента вывода пучка протонов.

В 2016 году на АИЦ–144 для основного режима работы ускорителя: : $p, E_k = 60,7 \pm 0,2 MeV$, были проведены коррекции амплитуды, фазы первой гармоники и положения медианной плоскости магнитного поля циклотрона. В результате, 15.06.2016 года было зафиксировано увеличение коэффициента вывода пучка протонов с $K_{ext} = 19 \pm 1$ % до $K_{ext} = 34 \pm 1$ %. Коэффициент вывода был стабилен втечение трёх дней. Эффективность вывода пучка протонов уменьшилась на 5 % после смены катода во внутреннем источнике ионов. На Рис. 1 показана зависимость измеренного тока пучка протонов от радиуса.



Рис. 1 Измеренный ток пучка протонов.

На основе использования созданной АСУ АИЦ–144, для основного режима работы циклотрона были проведены измерения кривых Смита–Гаррена: зависимости интегрального тока пучка от тока в главной катушке для определённого набора радиусных значений. На основе сделанных измерений были проведены расчёты динамики пучка протонов: фазового движения и фазо– энергетического интеграла. Результаты расчётов показаны на Рис. 2, 3.



Рис. 2 Фазовое движение. [1) Herve Marie. "*How to use Smith and Garren curves to correct isochronism*". // Internal report of IBA. December 16, 1993. (Blue curve). 2) R.E. Berg, H.G. Blosser, M.M. Gordon. "*Theoretical and experimental beam studies for the Michigan State University cyclotron*". // Nuclear Instruments and Methods. No 58 (1968). Pp. 327–341. (Red curve)].



Рис. 3 Фазо-энергетический интеграл.

В 2016 году в помещении протонной терапии для основного режима работы АИЦ–144 было проведено тестирование качества выведенного пучка протонов. На Рис. 4,5 представлены результаты выполненных измерений.



Рис. 4 Профиль пучка протонов со сцинтиллятора. (Коллиматор $\Phi=25 \text{ mm}$, экспозиция T=40 s).



Рис. 5 Пик Брэга при пробеге протонов в воде.

Из Рис. 4 видно, что профиль пучка имеет симметричную форму. Из Рис. 5 видно, что максимум пика Брэга при пробеге в воде расположен на L=28,81 mm. Длина заднего фронта пика Брэга в диапазоне от 90 % до 10 % составила $\Delta L = 0,79 \text{ mm}$, что является рекордным показателем для изохронных циклотронов, используемых для протонной терапии меланомы глаза с кинетической энергией вывода ионов $E_k \sim 60 \div 63 \text{ MeV}$.

Полученная в помещении протонной терапии корпуса АИЦ–144 кинетическая энергия протонов для 90 % заднего фронта пика Брэга составила $E_{k,end} \sim 58 \, MeV$. Разница между расчётным значением кинетической энергии на выходе из АИЦ–144 и значением, измеренным в помещении протонной терапии – это потери кинетической энергии протонов на стекло и воздух, которые составили $\Delta Ek \sim 2.7 \, MeV$. Из приведённых результатов видно, что пучок выведенных протонов полностью соответствовал требованиям подразделения протонной терапии циклотронного центра в Броновице (г. Краков, Польша) для лечения меланомы глаза.

Разработка поворотных магнитов для линии транспортировки

В настоящее время в НЭОНУ ЛЯП ведутся работы по изготовлению двух поворотных магнитов для линии транспортировки циклотрона АИЦ-144.

Магнит М1 расположен в линии транспортировки пучка протонов с энергией до 60.5 МэВ, выведенных из циклотрона АИЦ-144. Магнит должен заменить старый магнит и обеспечить поворот пучка протонов на 68 град. Общий вид предлагаемой конструкции магнита приведен на Рис.6.



Рис. 6 Общий вид нового магнита М1

Таблица 1. Параметры обмоток магнита М1

Количество обмоток	2
Количество секций в обмотке	7
Количество витков в секции	22
Общее количество витков	22x7x2=308
Тип проводника	Си, 8.5х8.5 мм, ø5.3 мм
Длина проводника в одной секции	38 м
Рабочий ток (протоны 60.5 МэВ)	255 A
Напряжение на обмотках	50 B
Мощность питания	12.5 кВт

Плотность рабочего тока	5.1 А/мм ²
Вес обмоток	240 кг

Магнит M2 расположен в линии транспортировки пучка протонов с энергией до 60.5 МэВ, выведенных из циклотрона АИЦ-144. Магнит должен заменить старый магнит и обеспечить поворот пучка протонов в диапазоне углов +13 до -24 град. Новый магнит имеет вертикальный зазор 14 см, при этом вакуумная камера имеет ферромагнитные крышки толщиной 2x3.5 см, что дает зазор для пучка – 7 см. Общий вид предлагаемой конструкции магнита приведен на Рис.7.



Рис. 7 Общий вид нового магнита М2

Основные результаты

 В 2018-2019 годах разработана конструкторская документация и изготовлено ярмо, на станке ЛЯП намотаны галеты для двух полу-обмоток поворотного магнита М1, предназначенного для работы в линии транспортировки пучков циклотрона АИЦ-144.



Рис. 8 Ярмо поворотного магнита М1. Рис. 9 Галеты для поворотного магнита М1. (ИЯФ ПАН, Краков, Польша).

 Отремонтирована и введена в эксплуатацию печь ЛЯП для запекания галет. Создана новая система управления питанием печи.

3. Создано и успешно опробовано новое программное обеспечение:

- АСУ для измерения кривых Смита-Гаррена (СГ) для работы со сверхпроводящим изохронным циклотроном SC-200, находящимся в стадии производства (ИФП КАН, Хэфей, Китай): SG Curves Measurement Program II 2018-2019 (C++). Успешное тестирование программы было проведено в декабре 2018 года в режиме эмуляции тока пучка.

- АСУ для автоматизированного измерения тока пучка с трёх ламелей (Low, Mean, High) пробника на три пико-амперметра KEITHLEY: 6485 для многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ ПАН, Краков, Польша): Beam Current Measurement Program 2019 (C++).

- Программа для пересчёта кривых Смита-Гаррена (СГ) в фазовое движение ускоряемых частиц в абсолютных значениях: SG Curves Recalculation Program 2018-2019 (C++).



Рис. 10 Печь ЛЯП для запекания галет.

Рис. 11 Измерение кривых Смита-Гаррена.

- 4. На основе созданного и задействованного программного обеспечения проведена успешная оптимизация магнитного поля многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ ПАН, Краков, Польша) для основного режима работы ускорителя (p, Ek=60,7 MeV) с целью увеличения интенсивности тока выведенного пучка без потери качества выведенного пучка. Стабильность тока выведенного пучка в течении ста секунд составила σ<2E-2. Коэффициент вывода пучка составил Kext=30±5 (%). Созданное и задействованное программное обеспечение:</p>
- Cyclotron Operator Help's Program Complex 2003-2019 (C++):
 - Cyclotron Operating Mode Calculation Program 2003-2019.
 - Isochronous Field Calculation Program 2003-2019.
 - Free Oscillations Research Program 2003-2019.
 - Phase Motion Research Program 2003-2019.
- Tool Program Complex 2003-2019 (C++):

- Cubic Spline Interpolation Program 2003-2019.
- Parabolic Interpolation Program 2003-2019.
- Magnetic Field Map Build Program 2003-2019.
- Magnetic Field Map Format Program 2003-2019.
- Equilibrium Orbits Research Program 2012-2019 (C++).
- B1Fi1 Correction Program 2012-2019 (C++).
- SG Curves Measurement Program 2014-2019 (C++).
- o SG1-2 Program 2012-2019 (Fortran).
- SG Curves Recalculation Program 2018-2019 (C++).
- Beam Current Measurement Program 2019 (C++).
- 5. Проведены расчеты динамики выведенных пучков в трактах транспортировки пучков многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ ПАН, Краков, Польша) с целью увеличения коэффициента транспортировки пучка от выхода из циклотрона до камеры облучения меланомы глаза у пациентов от Ktrans=80 (%) до Ktrans=100 (%).



Рис. 12 Профиль выведенного пучка для основного режима работы циклотрона АИЦ-144 .

 Закуплен на заводе-изготовителе в Санкт-Петербурге и отправлен в Краков новый генераторный тетрод ГУ-94А для работы в составе ВЧ-генератора многоцелевого изохронного циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ ПАН, Краков, Польша).



Рис. 13 Генераторный тетрод ГУ-94А для ВЧ-генератора циклотрона АИЦ-144 (ИЯФ ПАН, Краков, Польша).

Оформлен новый протокол о сотрудничестве между ОИЯИ, ЛЯП и ИЯФ ПАН (Краков, Польша): № 4903-2-20/20 от 10.02.2020. Проект: "Обновление и эксплуатация циклотронов AIС-144 и С-235 для использования их в протонной терапии" финансируется за счёт Программы Полномочного Представителя Республики Польша в ОИЯИ.

Публикации

1. K. Daniel, K. Gugula, J. Sulikowski, IFJ-PAN, Krakow, Poland. I. Amirkhanov, G. Karamysheva,

I. Kiyan, N. Morozov, E. Samsonov, JINR, Dubna, Russia.

"Operation Mode of AIC–144 Multipurpose Isochronous Cyclotron for Eye Melanoma Treatment", (eng). // PROCEEDINGS OF CYCLOTRONS 2013, Vancouver, Canada, ISBN 978–3–95450–128– Pp.461–463.

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/CYCLOTRONS2013/papers/fr1pb01.pdf (2014).

2. Amirkhanov I.V., Karamysheva G.A., Kiyan I.N., Sulikowski J.,

"Calculation of Proton Rotation Frequency in Static Equilibrium Orbits at the Isochronous Cyclotron" (rus/eng), // ISSN:1814–5957, eISSN:1814–5973, PEPAN LETTERS, 2015. V.12, No 3(194), pp. 673–677. / ISSN 1547_4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol.12, No. 3, pp. 428–431. © Pleiades Publishing, Ltd., 2015.

 I.V. Amirkhanov, I.N. Kiyan, J. Sulikowski. Automated Control System (ACS) for Smith-Garren (SG) Curves Measurement. // E9-2019-46. Preprint of the JINR, Dubna, 2019.

4. I.V. Amirkhanov, I.N. Kiyan, J. Sulikowski. Automated Control System for Smith-Garren Curves Measurement. // ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 57–64. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.

Циклотрон U-120M, Ржеж, Чехия

Tomas Matolochka

Циклотрон U-120M, был запущен в 1977 году в коллаборации ЛЯП ОИЯИ и ИЯФ, Ржеж, Чехия.



Рис. 14: Экспериментальный зал циклотрона U-120M

U-120М был изготовлен в Дубне в 1971 – 1977 гг. под руководством:



- Рис. 15: В.П. Дмитриевский,
- В.В. Кольга,
- Л.М. Онищенко



Рис. 16: Зденек Трейбал, Милослав Кранек, Милан Чигак, Йозеф Синагл

Из статьи Милана Чигака: "30 years of U-120M anniversary" .

Вывод пучка из ускорителя.



Рис. 17: Вывод отрицательных ионов обдиркой

Вывод отрицательных ионов обдиркой работает хорошо. Эффективность вывода положительных ионов: 4He 40 MeV, протоны 23 MeV имеет низкую эффективность 2 – 4 %.

Система вывода представлена на Рис. 18 и состоит из кикера, трех электростатических дефлекторов и магнитного корректора (не показан).



Рис. 18: Система вывода положительных ионов 16



Рис. 19: Вид компьютерной модели магнита



Рис. 20: Магнитное поле

Мы планируем помочь в анализе и оптимизации системы вывода из циклотрона, в связи с этим начали компьютерное моделирование магнита циклотрона и динамики пучка.

3 РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЦИКЛОТРОНА ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ ДЛЯ ИФП (ХЕФЕЙ, КНР)

В ходе реализации соглашения между Институтом физики плазмы (ИФП) китайской Академии наук в г. Хэфэй (КНР) и Объединенным институтом ядерных исследований, Дубна, (Россия), в г.Хэфэй идут пуско-наладочные работы сверхпроводящего изохронного циклотрона SC200, предназначенного для лечения онкологических заболеваний на протонных пучках [1]. Циклотрон будет ускорять протоны до энергии 200 МэВ. Планируется изготовить в Китае два ускорителя, один из которых будет работать в новом Медицинском центре в г. Хэфэе, другой изначально планровали в ЛЯП ОИЯИ, что позволило бы заменить морально и физически устаревший Фазотрон на более современный ускоритель, который может использоваться для дальнейших исследований и лечения методом протонной терапии. На Рис. 21 показано место возможного расположения циклотрона в корпусе №1.



Рис. 21: Медико-технический комплекс ОИЯИ с возможным положением SC200 циклотрона Физический проект сверхпроводящего изохронного протонного циклотрона SC200 был разработан в ОИЯИ при участии ASIPP. Проведены расчеты и выбраны параметры магнитной, ускоряющей и системы вывода пучка, просчитана динамика пучка из источника до выхода из циклотрона.

SC200 – это изохронный сверхпроводящий циклотрон с магнитной системой броневого типа и четырехсекторной спиральной структурой. Магнит циклотрона имеет диаметр 2.5 м, его вес составляет около 55 т. Среднее магнитное поле в циклотроне составляет 2.9/3.6 Т (центр/зона вывода). Сверхпроводящие обмотки заключены в криостат, все остальные части циклотрона теплые. SC200 - ускоритель работающий на фиксированной частоте, с фиксированным магнитным

полем и фиксированной энергией ~200 МэВ выведенного пучка. В циклотроне будет использован источник протонов PIG типа. Для ускорения пучка ионов на циклотроне SC200 планируется использовать 2 полуволновых резонатора, расположенных в противоположных долинах ускорителя и соединенных в центре. Ускоряющая система будет работать на 2-ой кратности ускорения, резонансная частота составляет 91 МГц. Много внимания было уделено, чтобы избежать наиболее опасных резонансов в процессе ускорения (см. рабочую диаграмму на Рис. 22).

Вывод пучка будет осуществляться посредством одного электростатического дефлектора, который расположен в долине между секторами.



Рис. 22: Диаграмма частот.

Разработанный в ЛЯП ОИЯИ проект SC200 одобрен экспертной комиссией в г. Хэфэе в октябре 2016 г.

Производство ускорителя началось в 2017 году. В настоящее время закончен технический проект SC202, каждая подсистема циклотрона Hefei изготовлена и проходит экспериментальную проверку. Криогенные свойства обмоток со сверхпроводящим магнитом успешно испытаны, результаты испытаний соответствуют проектным требованиям, изготовлен сверхпроводящий магнит. Источник ионов PIG был разработан и изготовлен. Испытание на малой мощности ускоряющих резонаторов завершено. Сборка, настройка и тестирование SC202 не закончены. Существует задержка в формировании магнитного поля циклотрона, связанная с задержкой производства криостата и сверхпроводящих катушек и длительным карантином в Китае из-за пандемии коронавируса.



Рис. 23 Вид циклотрона



Рис. 24 Магнитное поле посчитанное в CST Studio

Была разработана модификация циклотрона SC200 (Дубна) использующая схему вывода, существенно отличающуюся от схемы, примененной в циклотроне для медицинского центра Хэфэй.

Частицы из циклотрона SC200 (Дубна) выведятся одним электростатическим дефлектором ESD и двумя магнитными каналами MC1 и MC2 (Рис. 25). В системе вывода из SC200 (Дубна) будут установлены дополнительные каналы CM1 и CM2, для компенсации первой гармоники магнитного поля, которая может вызывать опасные резонансы 2Qz = 1 и Qr-Qz = 1.

Предложенная схема вывода позволяет эффективно выводить пучок из изохронного сверхпроводящего циклотрона с минимальным увеличением огибающих пучка (Рис. 26). Потери пучка будут определяться в основном толщиной септума дефлектора и будут составлять минимум 15% при толщине септума 0,1 мм. Подобную схему вывода можно применить для циклотрона со стандартной для протонной терапии энергией 230-250 МэВ.



Рис. 25 Вид циклотрона с системой вывода. Синяя линия - траектория частицы. Элементы схемы вывода: ESD - электростатический дефлектор, MC1, MC2 - пассивные магнитные каналы, CMC1, CMC2 - компенсирующие магнитные каналы.

Результаты работ над ускорителем SC200 с выводом за счет особой формы зазора между секторами защищены патентом на изобретение №2702140.



Рис. 26: Горизонтальное и вертикальное движение пучка во время вывода, жирные линии

Для точного и эффективного анализа магнитного поля при разработке циклотрона для протонной терапии SC200 (Хефей, Китай), изготавливаемого в сотрудничестве ЛЯП ОИЯИ и АСИПП, Хефей был разработан ряд программ.

Использование двумерной карты поля в средней плоскости для моделирования динамики пучка является традиционным методом, который используется на этапе ввода в эксплуатацию циклотрона при формировании магнитного поля.

Коды для моделирования динамики пучка были обновлены с помощью новых алгоритмов для расчета компонентов магнитного поля вне средней плоскости. Были написаны алгоритмы для создания трехмерных карт магнитного поля из двухмерной карты, полученной из измерений магнитного поля.

Самая большая проблема этих вычислений состоит в том, что производные магнитного поля в средней плоскости вычисляются, используя карту поля, которая уже содержит ошибку. Специальные математические алгоритмы были разработаны для получения гладких и реалистичных производных магнитного поля на средней плоскости (Рис. 27). Такие результаты были получены путем совмещения подгонки карты поля по сплайновой поверхности вместе с алгоритмами сглаживания.

Созданные трехмерные карты полей могут быть использованы для моделирования динамики пучка для исследования пересечения резонансов.



Рис. 27: Производные, полученные при использовании алгоритмов сглаживания. Высокая точность и высокая эффективность моделирования помогут на этапе ввода в эксплуатацию при формировании магнитного поля.

ПРОЕКТЫ ЦИКЛОТРОНОВ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ В ОИЯИ

Производство циклотрона SC200 столкнулось с множеством инженерных сложностей, которые в основном возникают из-за высокого магнитного поля ускорителя.

Создаваемые новейшие сверхпроводящие циклотроны для протонной терапии, такие как SC200, Pronova [2], Sumitomo 230 МэВ [3] имеют сходные параметры, определяющие структуру циклотрона. Данные проекты представляют из себя четырехсекторные циклотроны с магнитным полем в центре ~3 Тл. Такие параметры были выбраны в погоне за компактностью размеров. Ни один из перечисленных циклотронов ещё не запущен в эксплуатацию.

Поэтому, после тщательного анализа SC200, других проектов и действующих циклотронов для протонной терапии было решено переосмыслить некоторые проектные решения.

В области протонной терапии можно выделить два наиболее успешных ускорителя: Varian Proscan [4], разработанный Н. Blosser и др. в 1993 г. и C235 (IBA, Бельгия) [5]. Оба циклотрона имеют значительно меньшее магнитное поле в центре – 2.4 и 1.7 Тл.

Таким образом, прежде всего мы увеличили радиус полюса циклотрона, чтобы уменьшить среднее магнитное поле примерно до 1.5 Тл в центре. Соответствующая частота ВЧ-системы для этого значения магнитного поля составляет около 90 МГц при работе на 4-й гармонике.

Поскольку у циклотрона будет относительно небольшое магнитное поле, допустимо использование как сверхпроводящей, так и резистивной обмотки. Оба решения имеют свои плюсы и минусы.

Циклотрон SC230 (сверхпроводящая обмотка)

Разработан физический проект компактного сверхпроводящего циклотрона SC230 (91,5 МГц). Этот циклотрон может производить пучок протонов с энергией 230 МэВ для терапии и медикобиологических исследований. В таблице 1 перечислены основные параметры циклотрона SC230.

Тип магнита	сверхпроводящяя обмотка, тёплое ярмо
Источник ионов	PIG
Конечная энергия, МэВ	230
Радиус полюса, мм	1350
Среднее магн. поле (центр), Тл	1.5
Габариты (высота × диаметр), м	1.7×4
Вес, тонн	130

Таблица 1: Параметры циклотрона SC230

Зазор холма/долины, мм	50/700
Число ампер-витков	170 000
Частота ВЧ-системы, МГц	91.5
Номер гармоники	4
Количество ускоряющих резонаторов	4
Напряжение, центр/зона вывода, кВ	35/90
Мощность ВЧ-системы, кВт	40
Количество оборотов	600
Интенсивность пучка, мкА	1.0
Тип системы вывода	ESD

Компьютерное моделирование магнита

Моделирование проводилось в CST Studio [7] с параметризованной моделью магнита (см. Рис. 28), созданной в Autodesk Fusion 360.



Рис. 28: Трехмерная компьютерная модель циклотрона (магнит и ускоряющая система). Размеры ярма (см. Рис. 29, Рис. 28) были выбраны, чтобы ограничить рассеянное магнитное поле в диапазоне 200-300 Гс вблизи ускорителя, обеспечивая при этом полное насыщение металлических полюсов и ярма. Среднее магнитное поле и флаттер из модели CST Studio представлены на Рис. 30.



Рис. 29: Общие размеры магнитного ярма и обмотки SC230



Рис. 30: Среднее магнитное поле и флаттер в зависимости от радиуса Бетатронные частоты, рассчитанные с помощью программы на основе CYCLOPS, представлены на Рис. 31.



Рис. 31: Вертикальные и радиальные бетатронные частоты в SC230.

Проект ускоряющей системы

Резонаторы ВЧ-системы расположены в долинах магнита, геометрия резонаторов ВЧ-системы ограничена размером спиральных секторов. Для ускорения протонов мы планируем использовать 4 ускоряющих ВЧ-резонатора, работающих в режиме 4-й гармоники. Все четыре ВЧ-резонатора будут соединены в центре и будут работать на частоте приблизительно 91.5 МГц. Резонаторы могут быть оснащены индуктивным соединительным контуром и регулироваться с помощью подстроечных конденсаторов, как в SC200 [8].

Компьютерная модель



Рис. 32: Модель резонатора.





Из моделирования получены основные параметры полуволнового коаксиального резонатора с двумя опорами. Результат моделирования резонатора ВЧ-системы для циклотрона SC230 показан на Рис. 32.

Азимутальная протяжённость резонатора (между серединами ускоряющих зазоров) составляет около 40 градусов.



Рис. 34: Азимутальная протяжённость резонатора

Поскольку пучок будет ускоряться в режиме четвертой гармоники, мы полагаем, что магнитное поле, создаваемое ВЧ системой, не окажет ощутимого влияния на пучок.

В ходе моделирования были достигнуты требуемые значения ускоряющей частоты и напряжения в зависимости радиуса (см. Рис. 35.)



Рис. 35: Зависимость ускоряющего напряжения вдоль радиуса.

Потери мощности

Рассеиваемая мощность в модели рассчитывалась исходя из того, что стенки резонатора состоят из меди с проводимостью $\sigma = 5.8 \times 10^7$ Ом⁻¹. Добротность ВЧ-системы составила около 13800, а потери мощности во всех резонаторах были следующими: для 1 Дж запасенной в резонаторах энергии и напряжения в центре/зоне вывода 35-95 кВ, тепловые потери составили 43 кВт.

Расчёт показал, что общие требования к мощности и охлаждению ВЧ-системы достаточно малы. Вывод пучка из данного циклотрона будет осуществляться с помощью электростатического дефлектора (ЭСД). Высота дефлектора составляет 50 мм, что позволяет разместить его в аксиальном зазоре между секторами. Напряжение на ЭСД, необходимое для вывода пучка, составляет всего 100 кВ/см.

Циклотрон для протонной терапии RC240.

Магнитная система

Помимо сверхпроводящего циклотрона мы промоделировали конструкцию циклотрона, подобного циклотрону SC230, но с некоторыми изменениями, оптимизирующими конструкцию ускорителя с использованием резистивных (медных) обмоток и водяным охлаждением.

Опираясь на современные вычислительные возможности, можно разработать циклотрон с резистивными обмотками, размеры которых меньше, чем у лидера рынка протонной терапии C235 (IBA).

Тип магнита	резистивный
Источник ионов	PIG
Конечная энергия, МэВ	240
Радиус полюса, мм	1350
Среднее магн. поле (в центре), Тл	1.45
Габариты (высота × диаметр), м	1.62 × 3.95
Вес, тонн	140
Поле холма/долина, поле, Тл	1.8/0.4
Зазор холма/долины, мм	15/700
Число ампер-витков	120 000
Потребляемая мощность магнита, кВт	140
Частота ВЧ-системы, МГц	89

Таблица 2: Параметры циклотрона RC240

Номер гармоники	4
Количество ускоряющих зазоров	2
Напряжение, центр/зона вывода, кВ	50-110
Мощность ВЧ-системы, кВт	50
Количество оборотов	800
Интенсивность пучка, мкА	1.0
Тип системы вывода	ESD

Чтобы создать наиболее компактную конструкцию циклотрона с резистивной обмоткой, вертикальный зазор между секторами должен быть как можно меньше. В предложенной конструкции зазор между секторами составляет 15 мм, что привело к низкому значению тока в обмотке, а вес магнита составил около 140 тонн. Кроме того, было важно сохранить зазор между секторами постоянным, в отличии от дизайна IBA C235 с эллиптическим зазором, который уменьшается до 9 мм в зоне вывода. Такой подход намного проще и дешевле на стадии производства и облегчает контроль во время сборки. Для того, чтобы упростить транспортировку магнита, диаметр RC240 не превышает 4 м, каждый элемент ярма весит менее 30 тонн.



Рис. 36: Магнитный поток через медианную плоскость.

Число ампер-витков составляет 120000, и поэтому потребляемая мощность циклотрона достаточно мала – 140 кВт.

Среднее магнитное поле и флаттер, полученные из моделирования в CST Studio представлены на Рис. 37.



Рис. 37: Среднее магнитное поле и флаттер в зависимости от радиуса.

Для RC240 требуется в 2 раза меньше ампер-витков в обмотках по сравнению с IBA C235, поэтому мы можем использовать обмотки с намного меньшим поперечным сечением. Поперечное сечение обмотки RC240 составляет всего 272×170 мм², а у обмотки IBA C235 – около 600×500 мм². Таким образом, даже при намного меньшем магнитном поле и большем радиусе секторов, благодаря значительно меньшей обмотке общий размер и вес RC240 намного меньше, и он потребляет меньше энергии.

Результаты моделирования магнитного поля были экспортированы в Matlab для анализа с помощью программы на основе CYCLOPS. На Рис. 38 показана зависимость орбитальной частоты от радиуса, откуда можно сделать вывод о достижении достаточно хорошего изохронизма магнитного поля.







Рис. 39: Рабочая диаграмма.

Рис. 39 показывает, что рабочая точка не пересекает опасные резонансы. Траектория рабочей точки циклотрона RC240 отличается от траекторий в других циклотронах. И в IBA C235, и в

Varian, а также в проектах с магнитным полем в центре ~3 Тл (SC200, Sumitomo и Pronova) частота Qz остается ниже 0.5. В случае RC240 слишком высокий флаттер, поэтому мы немедленно «перепрыгиваем» через Qz = 0.5 и остаемся выше резонанса Qr = 2Qz. Был проведено расчёт динамики частиц с реалистичными трехмерными электрическими и магнитными полями, чтобы доказать, что такой нетрадиционный подход действительно работает.

Ускоряющая система

Два резонатора ВЧ-системы расположены в противоположных долинах магнита. Ускоряющие резонаторы ВЧ-системы будут работать на частоте 89 МГц (ускорение в режиме 4-й гармоники). Пространства в долине достаточно для размещения резонаторов с протяженностью по азимуту около 40 градусов.

Базовые параметры полуволнового коаксиального резонатора с двумя опорами получены из моделирования в CST Studio. Добротность ВЧ-системы составляет около 14000.

ВЧ-резонаторы будут соединены в центре и могут быть оснащены индуктивным соединительным контуром и регулироваться с помощью подстроечных конденсаторов.

Вывод пучка из данного циклотрона будет осуществляться с помощью ЭСД, размещенного в пустой долине. Напряжение на ЭСД, необходимое для вывода пучка, составляет всего около 100 кВ/см.

Таким образом, оба проекта циклотронов обладают следующими положительными характеристиками:

- Низкая потребляемая мощность.
- Высокое качество пучка.
- Минимальные инженерные усилия и сложности.
- Достаточно малый размер и вес ускорителя.

Заключение

Выбрав низкий уровень магнитного поля в циклотроне, мы обнаружили, что размеры циклотрона могут быть достаточно малыми при тщательном подборе параметров и геометриии ускорителя. Низкое магнитное поле позволяет эффективный вывод пучка с помощью электростатического дефлектора. Сверхпроводящий вариант легче, потребляет меньше энергии, имеет больший зазор между полюсами, однако сборка и эксплуатация сверхпроводящей обмотки дороже. Оба варианта являются отличными кандидатами для реализации медицинской исследовательской программы в ОИЯИ.

В обоих проектах заложены консервативные и отработанные решения. Концепция циклотрона с пониженным уровнем поля была опубликована [9] и представлена на ускорительных конференциях [10,11]. Применение инновационных решений, как например, не круглая форма обмотки приводит к циклотрону для протонной терапии с весом сравнимым со сверхпроводящим циклотроном VARIAN, при этом более дешевым и энергоэффективным за счет низкого энергопотребления ускоряющей системы и сверхпроводящей обмотки. Низкое энергопотребление обмотки делает возможным применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

Литература

[1] G.Karamysheva, et al., Present Status of the SC202 Superconducting Cyclotron Project, VIIIth International Particle Accelerator Conference (IPAC 2017), Copenhagen, Denmark, THPVA120.

[2] V. Smirnov et al., The R&D of a K230 SUPERCONDUCTING CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY, ECPM 2018, Dubna, Russia.

[3] H. Tsutsui et al., Status of SUMITOMO's superconducting isochronous cyclotron development for proton therapy, AccApp '17, Quebec, Canada, July 31-August 4, 2017, p.419.

[4] J. Schippers, R. Dölling, J. Duppich, G. Goitein, M. Jermann, A. Mezger et al., "The SC cyclotron and beam lines of PSI's new proton therapy facility PROSCAN", Nucl. Instr. and Meth., vol.B(261), p.773, 2007.

[5] D. Vandeplasche et al., Extracted beams from IBA's C235, Proceedings Particle Accelerator Conference, 1997, V.1

[6] O. Karamyshev et al. Conceptual design of the SC230 superconducting cyclotron for proton therapy, 10th Int. Partile Accelerator Conf. IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019, TUPTS059

[7] https://www.cst.com

[8] Gen Chen et al., Research and development of RF System for SC200 Cyclotron, 9th International Particle Accelerator Conference, IPAC18, Vancouver

[9] O. Karamyshev et al., CONCEPTUAL DESIGN OF THE SC230 SUPERCONDUCTING CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY, 2019, JINR Preprint E9-2019-2.

[10] O. Karamyshev et al., JINR PROJECTS OF CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY, Proceedings of the 22nd International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town, pp141-144, TUB02.

[11] O. Karamyshev et al., CONCEPTUAL DESIGN OF THE SC230 SUPERCONDUCTING CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY, IPAC 2019 - Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference, <u>TUPTS059</u>.

4. РАЗВИТИЕ ЦИКЛОТРОННОГО МЕТОДА УСКОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ

Компьютерное моделирование для производства сверхпроводящего циклотрона ProNova K230 для протонной терапии.

Научный проект компактного сверхпроводящего изохронного циклотрона с энергией 230 МэВ для лучевой терапии рака протонами был завершен благодаря сотрудничеству между Ionetix Corporation (Лансинг, США) и Объединенным институтом ядерных исследований (Дубна, Россия) [1]. Циклотрон разработан и производится компанией Pronova Solutions, LLC с расширенными функциями [2], [3] по сравнению с существующими машинами этого класса. В частности, вес циклотрона К230 составляет менее 60 тонн, что позволяет перевозить его по дороге. Обширные физические и инженерные расчеты были выполнены в процессе проектирования для соответствия техническим характеристикам, требуемым Pronova. Процесс научного проектирования включает в себя итеративную научную оптимизацию ввода, вывода, анализа магнита с помощью трехмерной динамики пучка с последующим обширным инженерным анализом, оптимизацией и сертификацией полученных систем. Детальное проектирование и строительство циклотрона К230 в настоящее время ведутся в компании Pronova Solutions, LLC.

Циклотрон К230 состоит из: сверхпроводящего магнита с теплой вакуумной камерой, внутреннего источника ионов малой мощности с холодным катодом, центральной области, высокочастотных резонаторов и системы вывода, использующей только один электростатический дефлектор и пять пассивных магнитных каналов (Рис. 40). Для точной оценки рабочих характеристик машины и количественной оценки потерь пучка в процессе проектирования были выполнены подробные современные моделирования пучка с помощью кодов SNOP и Z3cyclone с использованием трехмерных магнитных и электрических полей, создаваемых программой Tosca \ Орега3D.

Статус строительства :

График проекта К230 требовал, чтобы магнит был завершен до 2019 года, но, очевидно, произошла некоторая задержка.

37



Рис. 40: Вид в средней плоскости

Физический и технический проект всех подсистем, включая сверхпроводящий магнит, камеру пучка, внутренний ионный источник, РЧ резонаторы и систему вывода, завершены и готовы к производству (Рис. 40).

Текущая деятельность ОИЯИ в этом направлении включала, среди прочего, компьютерное моделирование на допуски на производство и сборку сверхпроводящего циклотрона[4].



Рис. 41: Сверхпроводящий циклотрон Pronova K230.

Работы по производству циклотрона продолжаются.

Сверхпроводящий циклотрон Ionetix Ion-12SC для производства медицинских изотопов

В сотрудничестве с корпорацией Ionetix продолжилась работа по поддержке уже работающей установки ION-12SC и подготовке новых проектных предложений для небольших циклотронов для медицинского или промышленного применения.

Институт The Adler Institute for Advanced Imaging и корпорация Ionetix рады сообщить, что строительство и установка нового революционного сверхпроводящего циклотрона ION-12SC небольшого размера уже завершены, см. Рис. 42. Эта потрясающая новая технология позволит производить радиофармацевтический препарат золотого стандарта Ammonia N-13 для ПЭТсканирования сердца.



Karel D. Kovnat PhD, of Adler Imaging welcomes the Ionetix ION-12SC cyclotron.

Рис. 42 Ion-12SC superconducting cyclotron at the Adler Institute for Advanced Imaging

Ion-12SC - это сверхкомпактный протонный сверхпроводящий изохронный циклотрон с энергией 12,5 МэВ для коммерческого производства медицинских изотопов, недавно разработанный в Ionetix Corporation [5,6,7,8]. Установка оснащена запатентованной сверхпроводящей магнитной системой, маломощным внутренним источником ионов PIG с холодным катодом и внутренней жидкой мишенью. Первоначально он был разработан для производства Аmmonia N-13 для применения в кардиологических дозах по требованию, но также может быть использован для производства F-18, Ga-68 и других медицинских изотопов, широко используемых в позитронноэмиссионной томографии (ПЭТ). Первый инженерный прототип был завершен и введен в эксплуатацию в сентябре 2015 года, и с тех пор были завершены четыре последующих циклотрона. Первые два были установлены и эксплуатируются в Мичиганском университете и Массачусетском технологическом институте. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы продолжили улучшать производительность, стабильность и надежность установок. Эти улучшения включают в себя: 1) добавление водяного охлаждения для ограничения рабочей температуры источника ионов для увеличения его срока службы и производительности, 2) компенсацию нежелательных низших гармоник магнитного поля 3) управление на основе обратной связи,

применяемое для регулирования интенсивности пучка на мишени путем регулировки тока катода ионного источника.

Циклотрон, установленный в Медицинской школе Мичиганского университета в начале этого года, использовался у приблизительно 100 пациентов в месяц (N-13). Теперь установки способны производить> 21 дозу в день при доступности> 99%. Производственное предприятие Ionetix способно производить до 30 установок в год.



Рис. 43 Ion-12SC unit C1 at the University of Michigan Medical School.

Ряд установок Ion-12SC был изготовлен на заводе Ionetix. Полученная интенсивность пучка на мишени близка к проектной. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на повышение производительности, стабильности и надежности установки, потребовали обширного компьютерного моделирования, включая анализ измеренных магнитных полей и моделирование динамики пучка по авторским программам в НЭОНУ ЛЯП. Эта деятельность позволила предсказать некоторые из механизмов потери пучка, а затем определить методы их коррекции путем настройки магнитного поля для увеличения интенсивности пучка на мишени.



Литература

1 V. Smirnov, S. Vorozhtsov, Z. Neville, G. Blosser, X. Wu, and J. Vincent. *The R&D of a K230 superconducting cyclotron for proton therapy*. Conference: 41st European Cyclotron Progress Meeting, 2-6 September, 2018, Dubna, Russia.

2 V. Derenchuk et al. *Application of Superconducting Technology for Proton Therapy*. NAPAC2016 – Proceedings, Chicago, IL, USA, October 9-14, 2016.

3 V. Derenchuk, Final Technical Report for the ProNova Solutions Contribution to: Compact, Low-cost, Lightweight, Superconducting, Ironless Cyclotrons for Hadron Radiotherapy, United States, Jul. 2018. doi: 10.2172/1458543.

4 V. Smirnov, S. Vorozhtsov, Z. Neville, G. Blosser, X. Wu, and J. Vincent. Computer Simulations on Manufacture and Assembly Tolerances for a Superconducting Cyclotron. DLNP Seminar on "Problems of charged particles accelerators", June 8, 2017.

5 https://www.facebook.com/ionetix/posts/the-adler-institute-for-advanced-imaging-adler-imaging-and-the-ionetix-corporati/492174958021292/

6 Xiaoyu Wu, Gabe Fawley Blosser, Jay Paquette, Nathan Usher, John J Vincent, *Recent Progress in R&D for Ioneix Ion-12SC Superconducting Cyclotron for Production of Medical Isotopes*. IPAC 2019.

7 V. Smirnov, S. Vorozhtsov V. Smirnov, S. Vorozhtsov, X. Wu, D. Alt, G. Blosser, G. Horner, J. Paquette, N. Usher, J. Vincent, Z. Neville. *Experimental Validation of the Field and Beam Dynamics Simulations for a Superconducting Cyclotron*. ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 204–210. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.

8 V. Smirnov, S. Vorozhtsov, X. Wu, and J. Vincent. *Innovative 20-MeV Superconducting Cyclotron for Medical Applications*. ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 899–906. © Pleiades Publishing, Ltd., 2019.

LINAC-200 ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ В ОИЯИ.

Разрабатываемые в отделе методы и программы разработки ускорителей циклотронного типа успешно используются не только для проектирования циклотронов, но и, например, были применены для ввода в эксплуатацию электронного линейного ускорителя ЛИНАК-200 (ЛЯП ОИЯИ) [1-5]. Предполагается, что ускоритель позволит проводить методические исследования создаваемых в ЛЯП и соседних лабораториях детекторов элементарных частиц на тестовых пучках электронов с энергией от 20 МэВ до 200 МэВ в широком диапазоне интенсивности пучка. В перспективе, энергия электронов может быть увеличена до 2 ГэВ. Были смонтированы пушка и четыре ускорительных станции из тринадцати, что уже дает возможность ускорять электроны до энергии 200 МэВ. После проведения ремонта в 118 корпусе линейный ускоритель будет введен в эксплуатацию и на нем будут устроены тестовые пучки электронов с необходимым вспомогательным оборудованием. Ожидается, что это произойдет в течение 2020 года.



Рис. 45 Линейный ускоритель электронов ЛИНАК-200 после первой стадии ремонта в 118 корпусе ЛЯП

Предметом начального рассмотрения является проектирование линии транспортировки электронного пучка от секции 2, где энергия пучка составляет 60-70 МэВ. Задача – отклонение пучка от основной линии ускорителя, отведение от него и направление на мишень вдоль оси, параллельной линейному ускорителю. Необходимо обеспечить функционирование линии в двух основных режимах работы, отличающихся сечением пятна пучка на мишени: 0.5×0.5 мм² и 100×100 мм². Линия может состоять из магнитных поворотных диполей и магнитных квадруполей.

Необходимо наличие свободного пространства перед мишенью для установки коллиматоров, ограничивающих поперечные размеры пучка.

Параметры пучка на выходе из секции 2 ускорителя: энергия пучка 60-70 МэВ (в расчетах используется 60 МэВ), геометрические поперечные эмиттансы 0.2 π ·мм·мрад, энергетический разброс ±200 кэВ, пиковый ток пучка 25 мА.

Линии состоят из двух 35-градусных поворотных диполей и двух квадруполей. Внешний диаметр ионопровода увеличивается с 30 до 240 мм. Длина линии, измеряемая от входа в первый поворотный магнит до мишени, растет с 4.1 м для 60-70 МэВ до 5.9 м для 200 МэВ (Рис. 46).



Рис. 46 Линии транспортировки пучков 60, 120 и 200 МэВ

Далее были проведены трехмерные расчеты динамики пучка с использование полей спроектированных диполей и квадруполей, показавшие, что в режимах работы с малым конечным размером пучка для всех трех линий можно обеспечить размер пятна пучка ~ 2.5×2.5 мм², либо ~ 4.0×0.6 мм². Переход от одного размера пучка к другому осуществляется за счет малого изменения полей квадруполей. Нет возможности уменьшить горизонтальный размер пучка (т.е. получить чтото вроде ~ 0.6×4.0 мм²). Таким образом, для получения малого диаметра пучка (~ 0.5×0.5 мм²) необходимо, по-видимому, использовать горизонтальный коллиматор. В режиме работы с большим конечным размером пучка обеспечивается размер пятна пучка не меньше, чем 100×160 мм². Для линии 60 МэВ размер может быть дополнительно увеличен за счет увеличения поля квадруполей. Для линий 120 и 200 МэВ поля квадруполей (8 Т/м) близки к максимально возможным. Если

возможно будет получить большие поля, то, соответственно, будет и больший размер пучка. Вертикальный размер всегда превышает горизонтальный, поэтому для выравнивания поперечных размеров необходимо использовать вертикальный коллиматор. При размере пучка ~200 мм начинаются потери частиц на апертуре ионопровода вблизи расположения мишени. Поэтому если задумываться о размере пучка, превышающем 200 мм (скажем для линии 60 МэВ), то нужно увеличить диаметр трубы.

Резистивные дипольные магниты типа DIA будут частью установки LINAC-200. Диполи изготовлены из ярма и катушек с водяным охлаждением, намотанных из полого медного проводника. Они имеют полную механическую апертуру 32 мм и длину железа (iron length) 340 мм. На Рис. 47 показан вид компьютерной модели дипольного магнита типа DIA. Техническая спецификация определяет требования к проектированию, изготовлению, испытаниям, измерениям и отгрузке магнитов DIA для ОИЯИ.



Рис. 47 Магнит дипольный DIA.

Резистивные квадрупольные магниты типа QA будут частью установки LINAC-200 в ОИЯИ. Квадруполи изготовлены из ярм и водоохлаждаемых катушек, намотанных из полого медного проводника. Они имеют вписанный диаметр 72 мм и длину железа (iron length) 270 мм.

На Рис. 48 показан компьютерный вид квадрупольного магнита типа QA.



Рис. 48 Магнит квадрупольный QA.

Расчетно-теоретические работы по установке LINAC-200 в ЛЯП ОИЯИ будут продолжены в рамках нового проекта.

Литература

1 http://dlnp.jinr.ru/images/phoca_thumb_1_dscf7663.jpg

2 В.Л. Смирнов, С.Б. Ворожцов. LINAC 200. Структура линий транспортировки с использованием 35-градусных поворотных магнитов. ОИЯИ Дубна, Внутренний отчет. 14 января, 2020.

3 В.Л. Смирнов, С.Б. Ворожцов. LINAC 200. Расчет динамики пучка с использованием трехмерных полей элементов. ОИЯИ Дубна, Внутренний отчет. 24 января, 2020.

4 A.S. Vorozhtsov.Technical specification. Bending dipole magnet type [DIA] for the linac-200 electron beam lines at JINR. DIA-070220-TS. 07.02.2020.

5 A.S. Vorozhtsov.Technical specification. Quadrupole magnet type [QA] for the linac-200 electron beam lines at JINR. QA-020220-TS. 20.02.2020.

КРАТКИЙ ССВУ – АНАЛИЗ

В НЭОНУ ЛЯП разработаны известные в мире коды расчетов динамики пучка, применяемые при проектировании различных ускорителей циклотронного типа, как в России, так и в ряде стран мира. В составе коллектива работающего по проекту 2 доктора наук, 8 кандидатов наук (из них 5

моложе 35 лет) и 5 молодых специалистов, работающих над кандидатскими диссертациями. За 2016-2020 годы сотрудниками отдела в рамках темы 03-2-1102-2016/2020 опубликовано около 25 статей в реферируемых журналах, сделано более 50 докладов на международных и российских научных конференциях и совещаниях. Оформлен один патент на изобретение №2702140.