

*April, 2018*

03-2-1102-2016/2018

## **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. Морозов Н.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.**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФАЗОТРОНА И ТРАКТОВ ЕГО ПУЧКОВ.**  
Яковенко С.Л., Шакун Н.Г.

Основной задачей темы 1102 является поддержание Фазотрона в рабочем состоянии и проведение модернизации ускорителя и трактов пучков. За период с 2015 по 2018 годы были выполнены следующие работы по модернизации Фазотрона и трактов пучков:

- Внедрена автоматизированная система управления трактами проводки пучков (АСУ ТП) с усовершенствованием системы регулирования и стабилизации, заменой компьютерной техники и разработкой нового программного обеспечения;
- Продолжены 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 (снижение потребляемой мощности около 200 кВт);
- Проведена модернизация системы корректировки положения медианной поверхности пучка протонов, ускоряемого внутри камеры установки "Ф".
- Проведена модернизация ускоряющей системы (дуант) ускорителя.

В настоящее время Фазотрон работает в среднем 1000 часов в год. Из них на медицинские исследования тратится 80%, на эксперименты ФАЗА, БУРАН - 13% и 7% времени на собственные нужды ускорителя.

## 2. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИКЛОТРОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

*Циклотрон АИЦ–144 (ИЯФ ПАН, Польша)*

Киян И.Н., Морозов Н.А., Самсонов Е.В.

Работа проводилась согласно протоколу № 4546–2–16/18 о выполнении совместной научно–исследовательской работы, заключённому между ОИЯИ и ИЯФ ПАН 27 октября 2015 года.

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, 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, начальником отдела АИЦ–144 была поставлена задача добиться стабильного максимального значения коэффициента вывода пучка протонов  $K_{ext} = 34 \pm 1 \%$ .

В 2016 году на АИЦ–144 для основного режима работы ускорителя: :  $p$ ,  $E_k = 60,7 \pm 0,2 \text{ MeV}$ , 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 в течение 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.

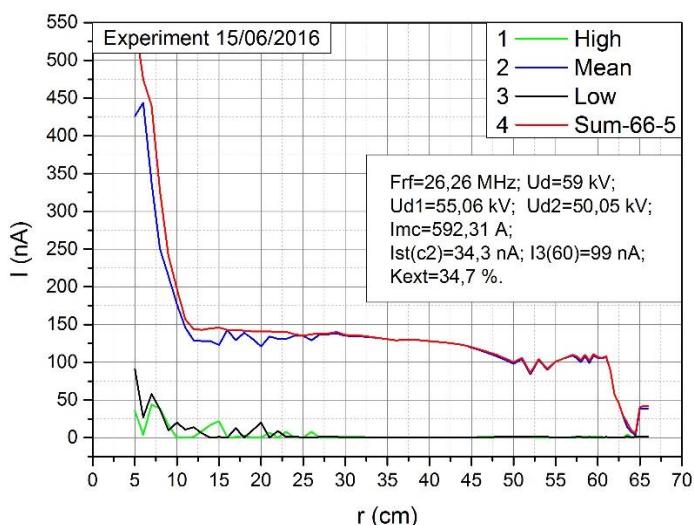


Рис. 1 Измеренный ток пучка протонов.

На основе использования созданной АСУ АИЦ–144, 21.06.2016 года 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.

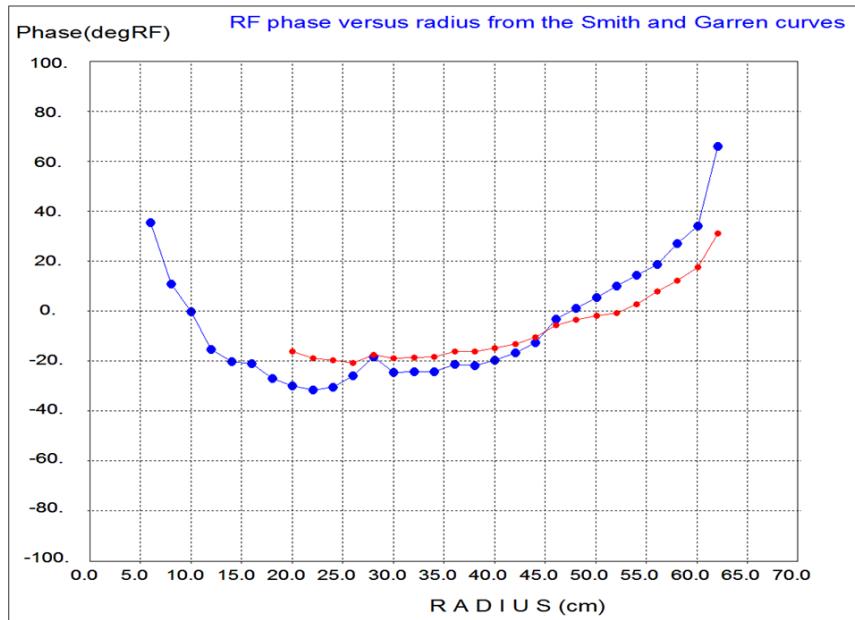


Рис. 2 Фазовое движение. [1) Herve Marie. “How to use Smith and Garren curves to correct isochronism”. // Internal report of IBA. December 16, 1993. (Blue curve). 2) R.E. Berg, H.G. Blosser, M.M. Gordon. “Theoretical and experimental beam studies for the Michigan State University cyclotron”. // Nuclear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

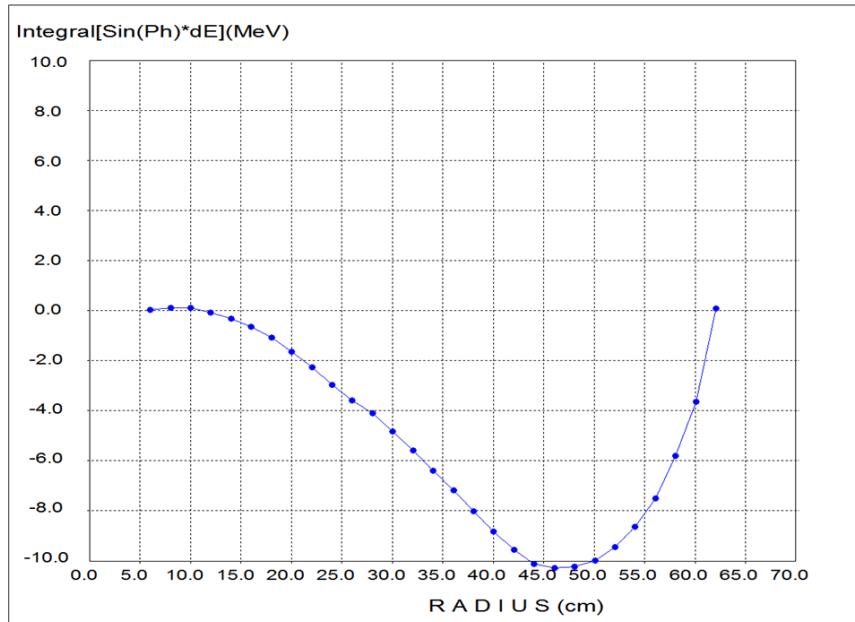


Рис. 3 Фазо–энергетический интеграл.

Значение фазо–энергетического интеграла на радиусе заброса пучка в электростатический дефлектор  $R = 62 \text{ см}$  оказалось равным нулю. Это говорит о правильности формирования магнитного поля АИЦ–144, что обеспечило необходимое условие для получения стабильного максимального значения коэффициента вывода пучка протонов  $K_{ext} = 34 \pm 1 \%$ .

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.

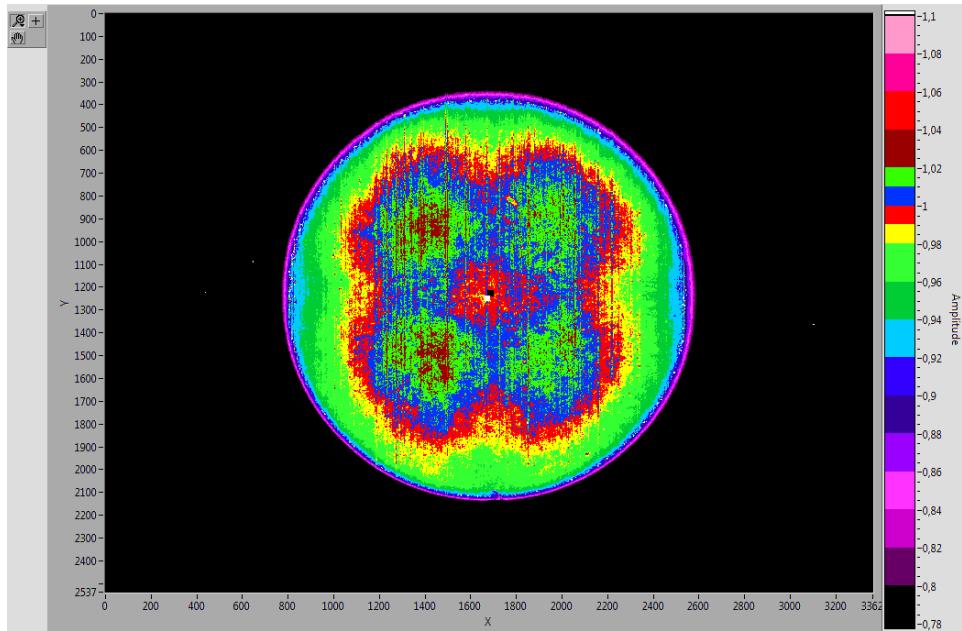


Рис. 4 Профиль пучка протонов со сцинтиллятора. (Коллиматор  $\Phi=25\text{ mm}$ , экспозиция  $T=40\text{ s}$ ).

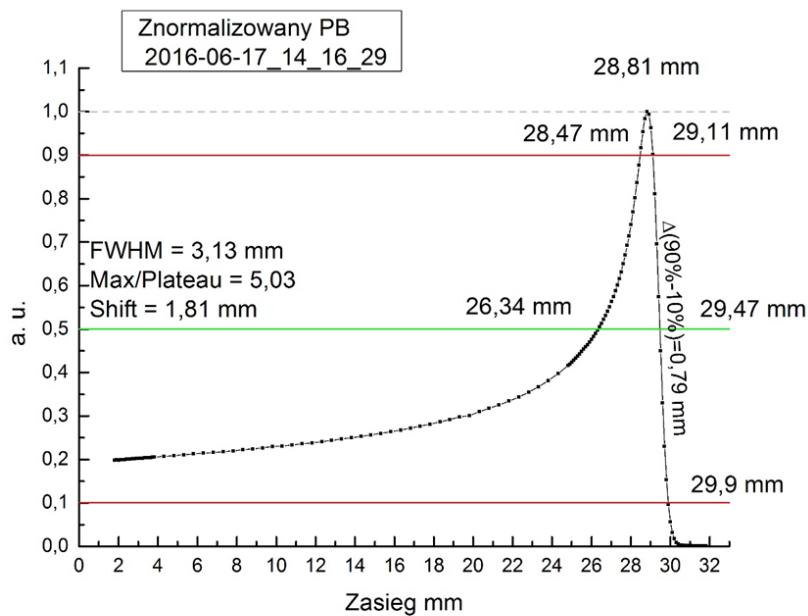


Рис. 5 Пик Брэга при пробеге протонов в воде.

Из Рис. 4 видно, что профиль пучка имеет симметричную форму. Из Рис. 5 видно, что максимум пика Брэга при пробеге в воде расположен на  $L=28,81\text{ mm}$ . Допустимый диапазон значений  $L$  для максимума пика Брэга при лечении меланомы глаза на АИЦ–144 составляет

$L = 28,8 \pm 0,18 \text{ mm}$ . 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  $E_{k,end} \sim 58 \text{ MeV}$ . 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  $\Delta E_k \sim 2,7 \text{ MeV}$ . Из приведённых результатов видно, что пучок выведенных протонов полностью соответствует требованиям подразделения протонной терапии циклотронного центра в Броновице (г. Краков, Польша), которое занимается лечением 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.

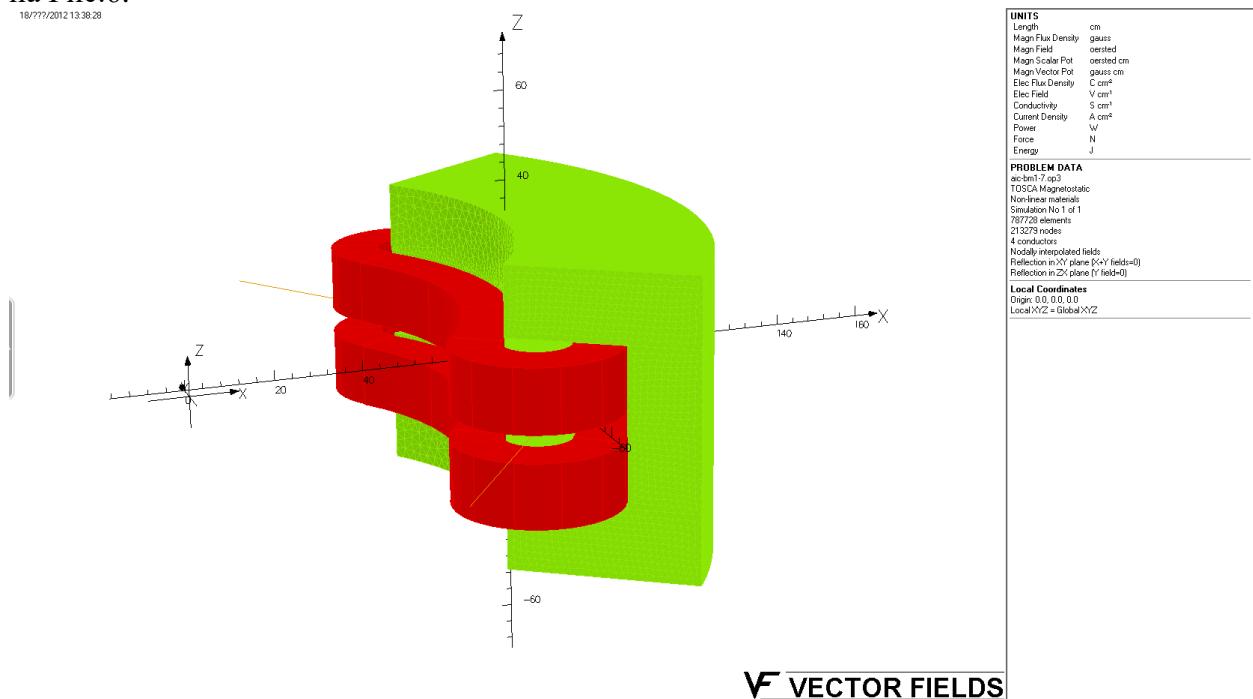


Рис. 6 Общий вид нового магнита М1

Таблица 1. Параметры обмоток магнита М1

Количество обмоток	2
Количество секций в обмотке	7
Количество витков в секции	22
Общее количество витков	$22 \times 7 \times 2 = 308$
Тип проводника	Cu, 8.5x8.5 мм, Ø5.3 мм
Длина проводника в одной секции	38 м
Рабочий ток (протоны 60.5 МэВ)	255 А
Напряжение на обмотках	50 В
Мощность питания	12.5 кВт
Плотность рабочего тока	5.1 А/мм <sup>2</sup>
Расход охлаждающей воды (при давлении на входе 4 ат)	$2.5 \times 14 = 35$ л/сек
Температура охлаждающей воды на выходе (на входе температура 25 град.)	30
Вес обмоток	240 кг

Магнит М2 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.

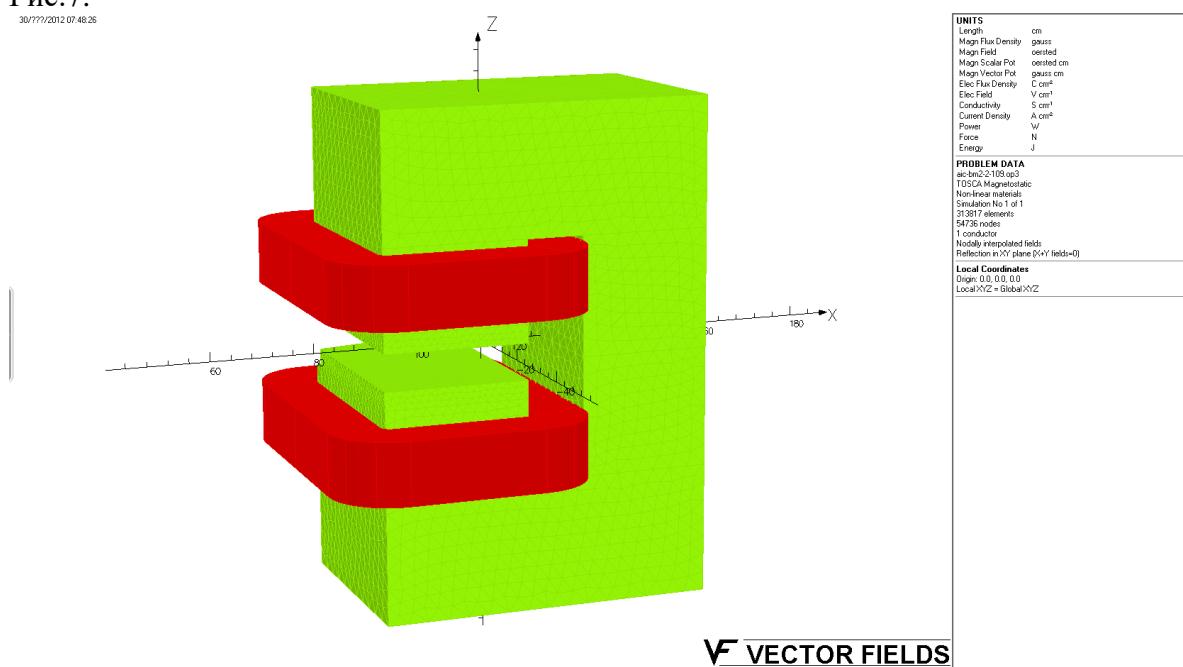


Рис. 7 Общий вид нового магнита М2

### ***Основные результаты***

- а) На основании рассчитанной динамики пучка были оптимизированы настройки гармонических токов катушек для циклотрона АИС-144. Медианная плоскость магнитного поля была выровнена для основного режима работы циклотрона АИС-144 ( $p, E_k \sim 60,5$  МэВ,  $Fr_f = 26,26$  МГц).
- б) Ускорение и вывод протонного пучка из циклотрона АИС-144 выполнялись с использованием новых настроек тока в гармонических катушках. Достигнуто максимальное устойчивое значение коэффициента вывода пучка  $K_{ext} = 35\%$ .
- в) Организовано стабильное облучение пучком протонов пациентов с оптимальным пробегом в воде. Это позволяет облучать опухоли, расположенные внутри глаза на расстоянии максимум 29,1 - 29,9 мм (от 90% до 10% от заднего фронта пика Брага), это соответствует энергии протонов пучка на выходе из АИС-144 циклотрона приблизительно  $60,7 \pm 0,2$  МэВ. Полученные результаты являются полностью удовлетворяющими поставленным задачам.
- г) Были приобретены два тетрода (ГУ92А - российское производство) для ВЧ-генератора циклотрона АИС-144. (Договор поставки № 1003 / 397-200 / 1680).
- д) В течение четвертого квартала 2016 года (по настоящее время) началось разработка поворотных магнитов M1, M2 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.

## *Циклотрон U-120M, Ржевж, Чехия*

Tomas Matolochka

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

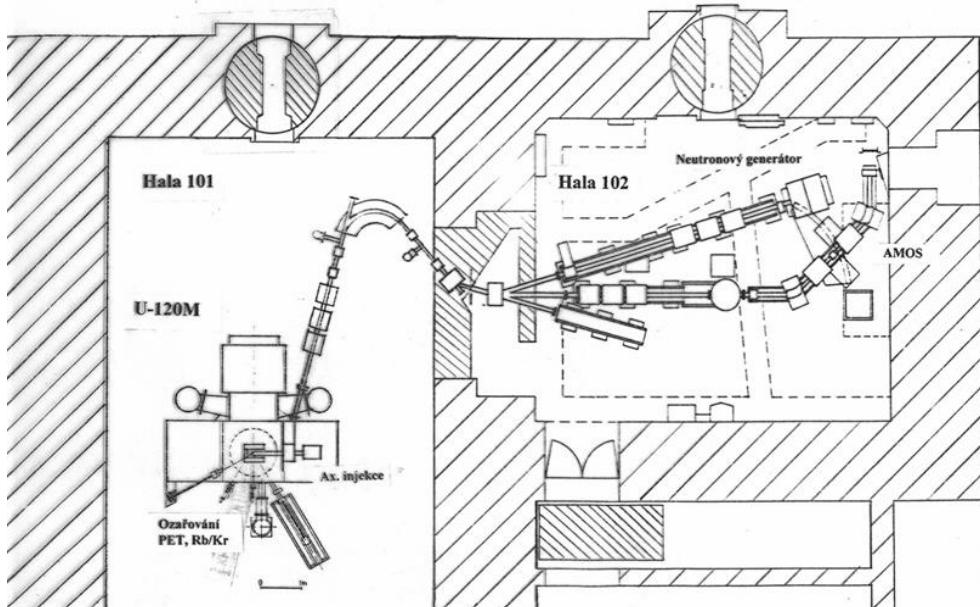


Рис. 8: Экспериментальный зал циклотрона U-120M

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



Рис. 9: В.П. Дмитриевский,

В.В. Кольга,

Л.М. Онищенко

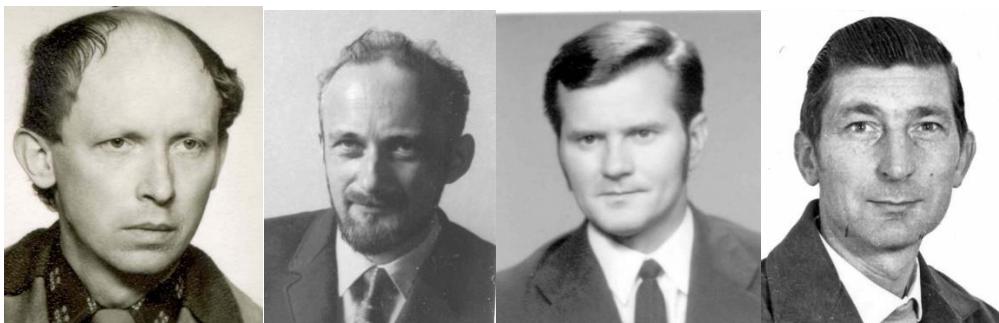


Рис. 10: Зденек Трейбал, Милослав Кранек, Милан Чигак, Йозеф Синагл

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

## *Выход пучка из ускорителя.*

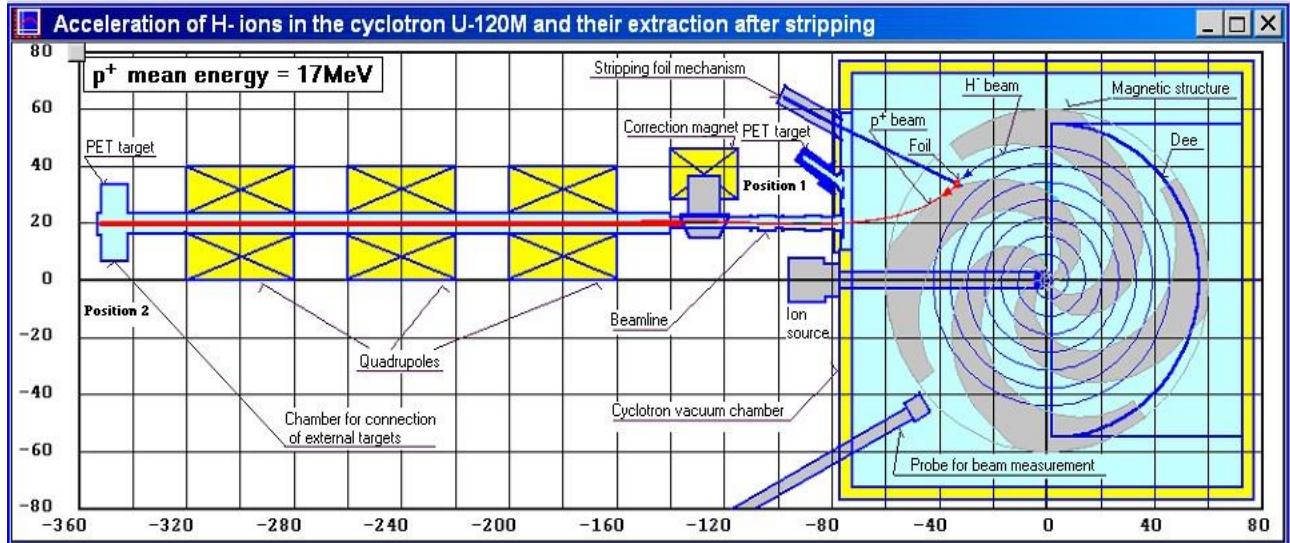


Рис. 11: Выход отрицательных ионов обдиркой

Выход отрицательных ионов обдиркой работает хорошо. Эффективность вывода положительных ионов:  ${}^4\text{He}$  40 MeV, протоны 23 MeV имеет низкую эффективность 2 – 4 %.

Система вывода представлена на Рис. 12 и состоит из кикера, трех электростатических дефлекторов и магнитного корректора (не показан).



Рис. 12: Система вывода положительных ионов

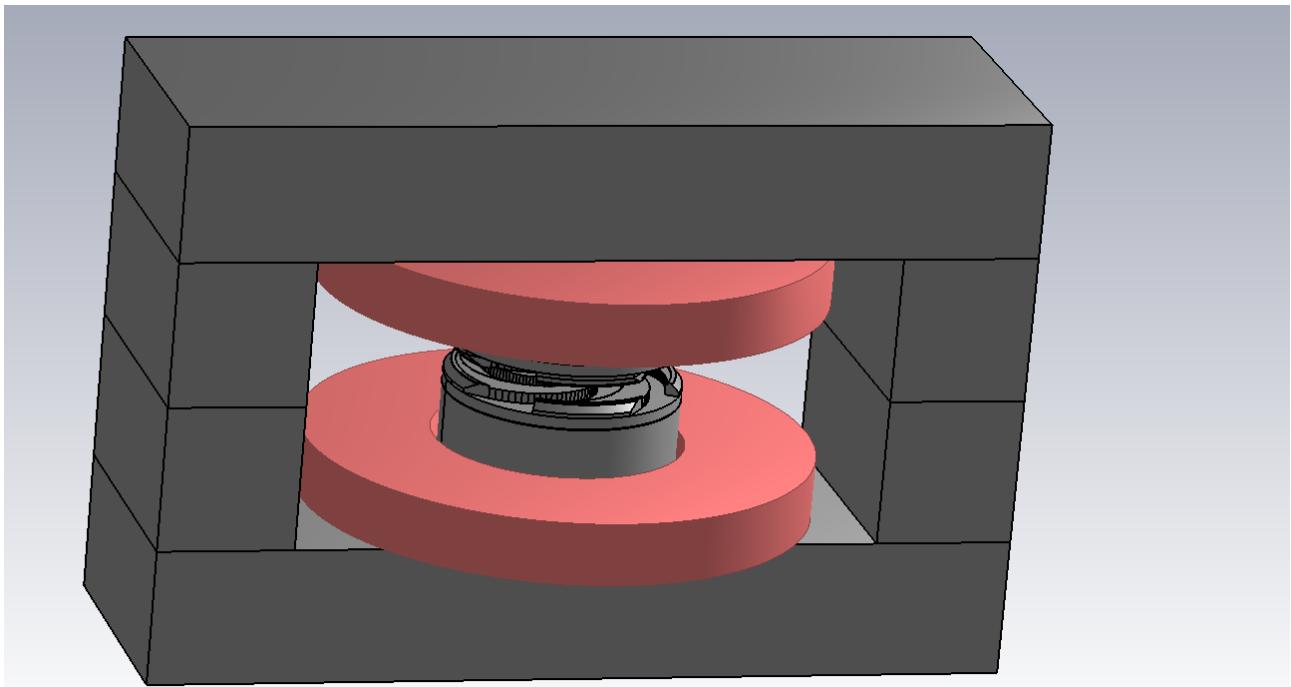


Рис. 13: Вид компьютерной модели магнита

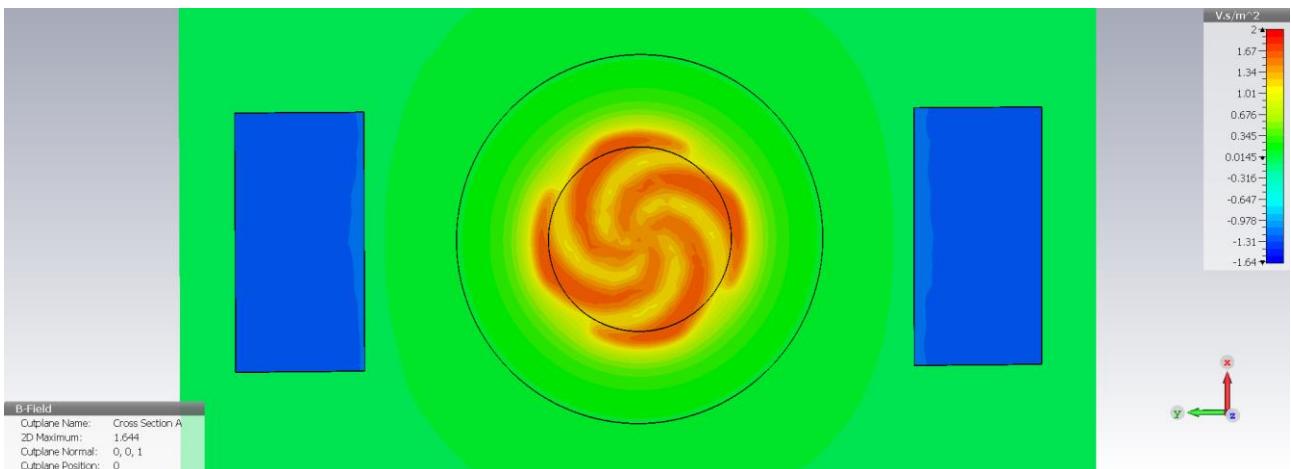


Рис. 14: Магнитное поле

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 договора между Институтом физики плазмы (ИФП) китайской Академии наук в г. Хэфэй (КНР) и Объединенным институтом ядерных исследований, Дубна, (Россия), в ОИЯИ разработан проект сверхпроводящего изохронного циклотрона SC202, предназначенного для лечения онкологических заболеваний на протонных пучках. Циклотрон будет ускорять протоны до энергии 200 МэВ с максимальной интенсивностью пучка 1  $\mu$ А. Планируется изготовить в Китае два ускорителя, один из которых будет работать в новом Медицинском центре в г. Хэфэе, другой придет на смену Фазотрону Медико-технического центра ЛЯП ОИЯИ, другой – в ЛЯП ОИЯИ, что позволит заменить морально и физически устаревший Фазотрон на более современный ускоритель, который будет использоваться для дальнейших исследований и лечения методом протонной терапии. На Рис. 15 показано место возможного расположения SC202 в корпусе №1.

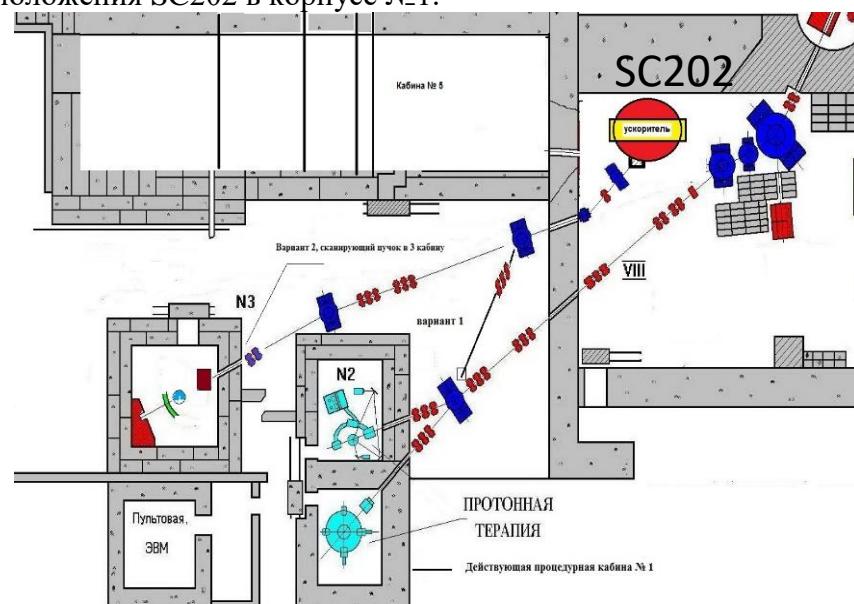


Рис. 15: Медико-технический комплекс ОИЯИ с возможным положением SC202 циклотрона

К настоящему времени разработан физический проект сверхпроводящего изохронного протонного циклотрона SC202. Проведены расчеты и выбраны параметры магнитной, ускоряющей и системы вывода пучка, просчитана динамика пучка из источника до выхода из циклотрона.

SC202 – 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 составит 2.9/3.6 Т (центр/зона вывода). Сверхпроводящие обмотки будут заключены в криостат, все остальные части циклотрона теплые. SC202 - 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 SC202 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 составит 91 МГц. Много внимания

было уделено, чтобы избежать наиболее опасных резонансов в процессе ускорения (см. рабочую диаграмму на Рис. 16).

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

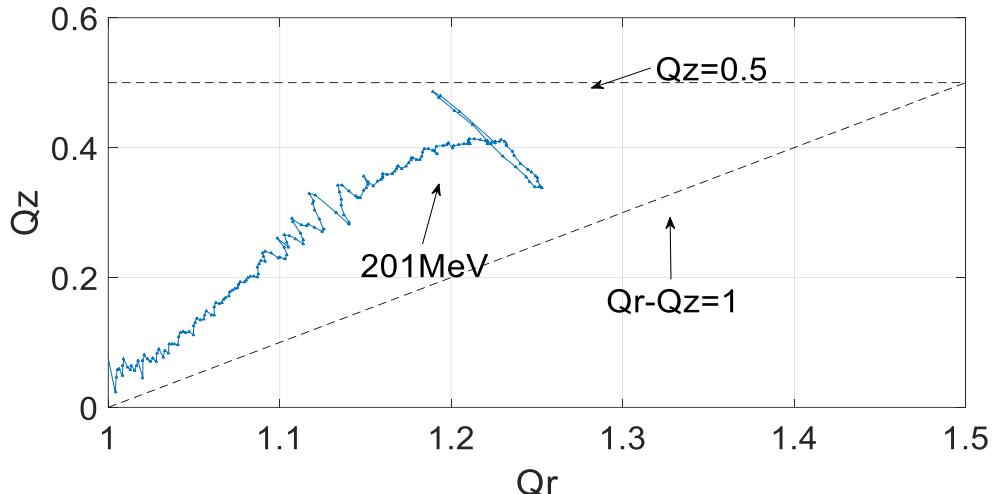
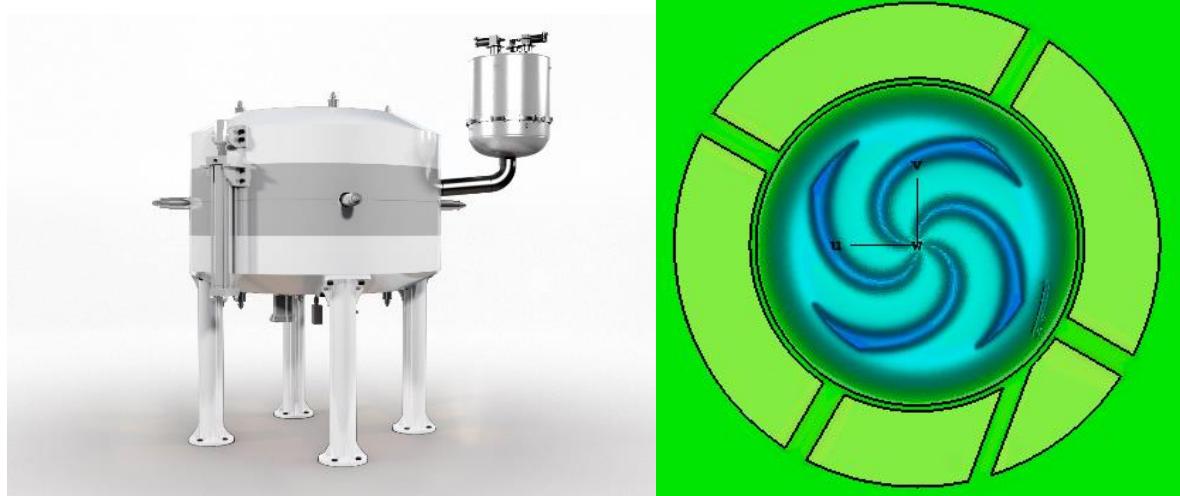


Рис. 16: Диаграмма частот.

Разработанный в ЛЯП ОИЯИ проект SC202 одобрен экспертной комиссией в г. Хэфэе в октябре 2016 г.

Производство ускорителя началось в 2017 году. В 2018 году планируется осуществить пуск первого экземпляра циклотрона в г. Хэфэе. Результаты разработки циклотрона SC202 будут применены при организации массового производства циклотронов в ИФП, Китай. Проектирование и производство подсистем SC202 выполняются в соответствии с графиком проекта. Существует некоторая задержка в производстве криостата и сверхпроводящих катушек.



Циклотрон SC202 (Дубна) находится на стадии проектирования. В нем будет использована схема вывода, существенно отличающаяся от схемы, примененной в циклотроне для медицинского центра Хэфэй.

Частицы из циклотрона SC202 (Дубна) будут выведены одним электростатическим дефлектором ESD и двумя магнитными каналами MC1 и MC2 (Рис. 19). В системе вывода из

SC202 (Дубна) будут установлены дополнительные каналы СМ1 и СМ2, для компенсации первой гармоники магнитного поля, которая может вызывать опасные резонансы  $2Q_z = 1$  и  $Q_r - Q_z = 1$ .

Предложенная схема вывода позволяет эффективно выводить пучок из изохронного сверхпроводящего циклотрона с минимальным увеличением огибающих пучка (Рис. 20). 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.

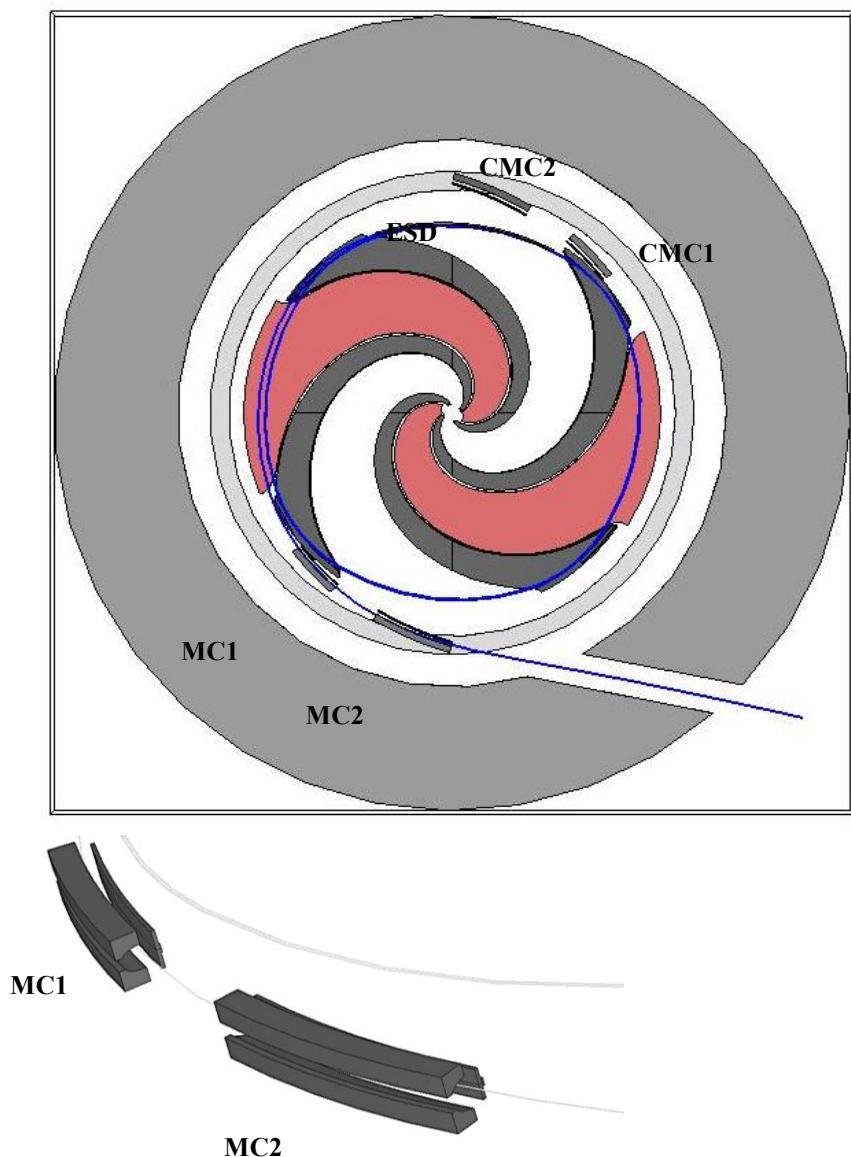


Рис. 19 Вид циклотрона с системой вывода. Синяя линия - траектория частицы. Элементы схемы вывода: ESD - электростатический дефлектор, MC1, MC2 - пассивные магнитные каналы, СМС1, СМС2 - компенсирующие магнитные каналы.

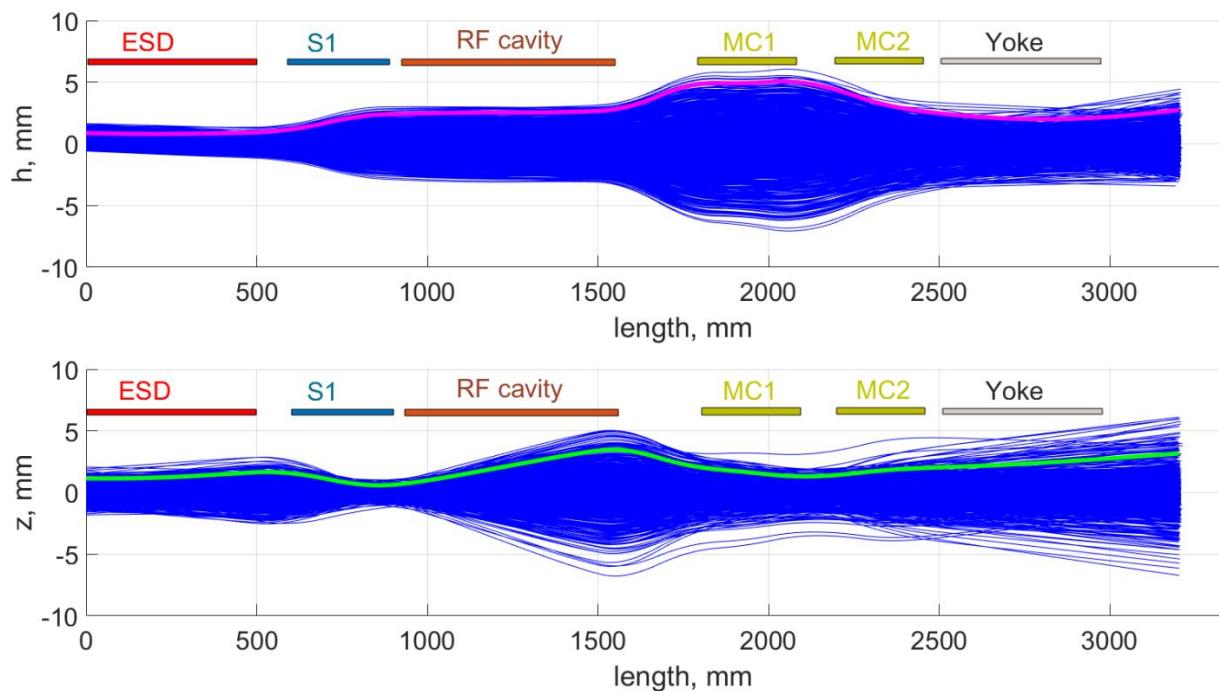


Рис. 20: Горизонтальное и вертикальное движение пучка во время вывода, жирные линии

Для точного и эффективного анализа магнитного поля при разработке циклотрона для протонной терапии SC202 (Хефей, Китай), изготавливаемого в сотрудничестве ЛЯП ОИЯИ и АСИПП, Хефей был разработан ряд программ.

Выбран и применен алгоритм получения сглаженных производных индукции магнитного поля до четвертого порядка для проведения расчетов динамики пучка с использованием двумерной карты поля (Рис. 21). С помощью Curve Fitting Toolbox была построена модель поверхности  $B_z(r,\phi,0)$  с использованием интерполяции кубическими сплайнами. Ближайшие планы: математическое моделирование динамики пучка с последующей коррекцией сформированного магнитного поля в циклотроне для протонной терапии SC202 (Хефей, Китай) на основе измеренных карт магнитного поля и измеренных кривых Смита-Гаррена.

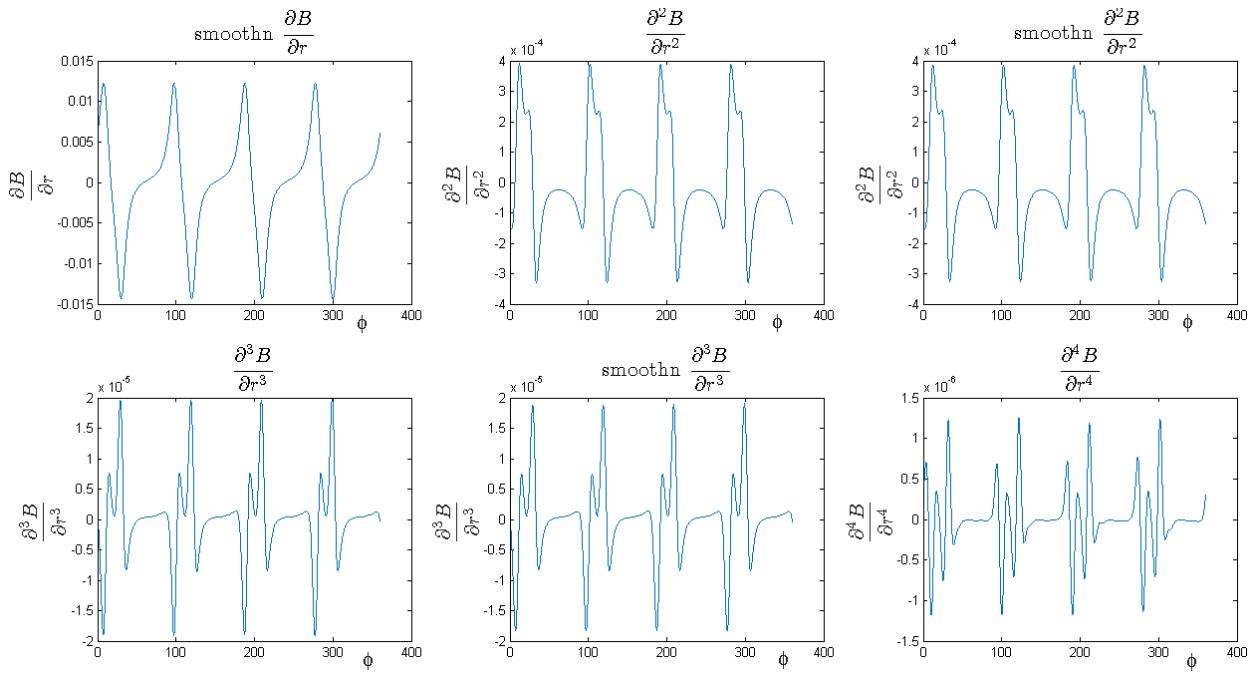


Рис. 21: Производные, полученные при использовании алгоритмов сглаживания.

Высокая точность и высокая эффективность моделирования помогут на этапе ввода в эксплуатацию при формировании магнитного поля.

### Публикации

1. XXV Russian Particle Accelerator Conference, Russian Academy of Science, Scientific Council on Charged Particle Accelerators, Peterhof, St. Petersburg, Russia *HADRON THERAPY RESEARCH AND APPLICATIONS AT JINR*, Grigori Shirkov, Galina Karamysheva, Semion Gurskiy, Oleg Karamyshev, Nikolay Morozov, Dmitriy Popov, Evgeny Samsonov, Stepan Shirkov, Grigoriy Trubnikov, 5, 2016.
2. IPAC'16, the Seventh International Particle Accelerator Conference, Pohang Accelerator Laboratory, Korea, *RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A COMPACT SUPERCONDUCTING CYCLOTRON SC200 FOR PROTON THERAPY*, S.V. Gurskiy, G.A. Karamysheva, O.V. Karamyshev, S.A. Kostromin, N.A. Morozov, E.V. Samsonov, G.D. Shirkov, Y. Bi, Y. Song, K. Ding, G. Chen,, 2016 .
3. IPAC'16, the Seventh International Particle Accelerator Conference, Pohang Accelerator Laboratory, Korea, *RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A COMPACT SUPERCONDUCTING CYCLOTRON SC200 FOR PROTON THERAPY*, S.V. Gurskiy, G.A. Karamysheva, O.V. Karamyshev, S.A. Kostromin, N.A. Morozov, E.V. Samsonov, G.D. Shirkov, Y. Bi, Y. Song, K. Ding, G. Chen,, 2016.
4. IPAC'16, the Seventh International Particle Accelerator Conference, Pohang Accelerator Laboratory, Korea, *COMPUTER MODELING OF MAGNET FOR SC200 SUPERCONDUCTING CYCLOTRON*, G. Karamysheva, O.Karamyshev, N. Morozov, E. Samsonov, G.Shirkov, Yuntao Song, Yanfang Bi, Hansheng Feng, Junjun Li, Shuangsong Du, Jinxing Zheng, Kaizhong Ding, Gen Chen, Jian Ge, Xiaogang Liu, 2016.

5. 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, Zürich, Switzerland, *Preliminary Design of RF System for SC200 Superconducting Cyclotron*, Oleg Karamyshev, Galina Karamysheva, Nikolay Morozov, Evgeny Vasilievic и др., 2016 .
6. 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, Zürich, Switzerland, *Study of the Beam Extraction from Superconducting Cyclotron SC200*, K.Z.Ding†, Y.F.Bi, G.Chen, Y.H.Chen, S.S.Du, H.S. Feng, J.Ge, J.J. Li, Y.T.Song, Y.H. Xie, J.X.Zheng G.Karamysheva, O.Karamyshev, N.Morozov, E.Samsonov, G.Shirkov, MOP14, 2016.
7. 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, Zürich, Switzerland, Computer Modelling of Magnet for SC202 Superconducting Cyclotron, G.Karamysheva, O.Karamyshev, N.Morozov, E.Samsonov, G.Shirkov.
8. 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, Zürich, Switzerland, S. Gurskiy, COMPACT SUPERCONDUCTING CYCLOTRON SC200 FOR PROTON THERAPY, G.Karamysheva, O.Karamyshev, N.Morozov, D.Popov, E.Samsonov, G.Shirkov, S.Shirkov.

## 4. РАЗВИТИЕ ЦИКЛОТРОННОГО МЕТОДА УСКОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ

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

Ionetix Corporation, с определяющим вкладом от участников ОИЯИ, завершила концептуальный и технический проект ускорителя. Корпорация Tesla, которая отвечала за проектирование, строительство и испытание циклотронного криостата, провела расчеты термодинамики магнита. Чтобы найти более простую коммерчески жизнеспособную систему с аналогичными характеристиками (общий инженерный дизайн), далее будет проработан подробный проект, изготовление, сборка и последующий ввод в эксплуатацию. Ionetix продолжит оказывать техническую поддержку в этом проекте с участием участников ОИЯИ.

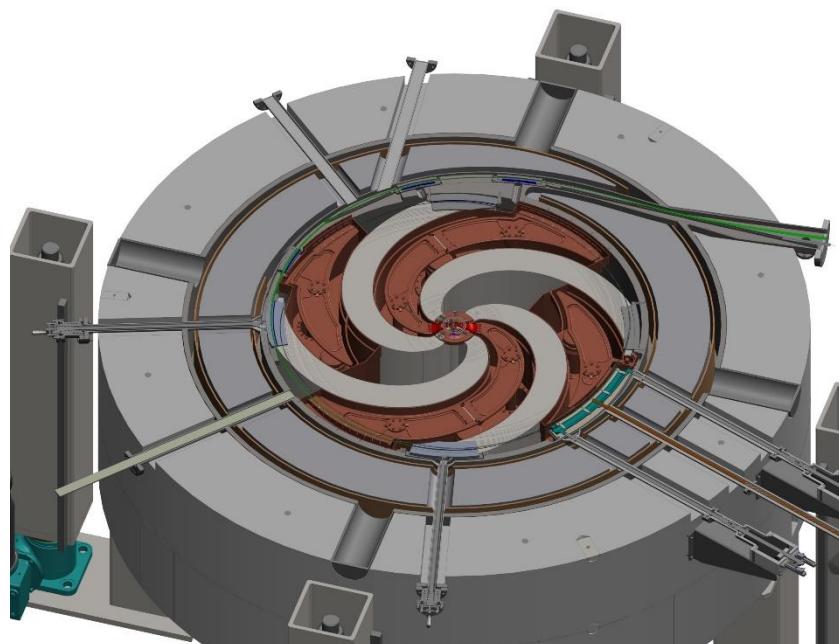


Рис. 22: Вид в средней плоскости

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. 22: Вид в средней плоскости Рис. 22).

*ProNova* возглавляет текущий проект по закупке, изготовлению, сборке и окончательному вводу в эксплуатацию сверхпроводящего циклотрона K230 при научной, и технической поддержке от Ionetix и ОИЯИ.

Корпорация Tesla (Великобритания) отвечает за проектирование, строительство и тестирование циклотронного криостата K230 и сверхпроводящей катушки.

График производства:

Aug 2017 - Пронова завершила контракт с Tesla, чтобы начать строительство криостата.  
Сентябрь 2017 - Тесла официально начал строить магнит K230.

Декабрь 2017 года. Первоначальный план состоял в том, чтобы закончить магнит K230, но, вероятно, произойдет 6-месячная задержка.

В конце 2018 года - текущий план состоит в том, закончить сборку всего циклотрон K230.

Текущая деятельность ОИЯИ в этом направлении включает, среди прочего, компьютерное моделирование на допуски на производство и сборку сверхпроводящего циклотрона<sup>[\*]</sup>.

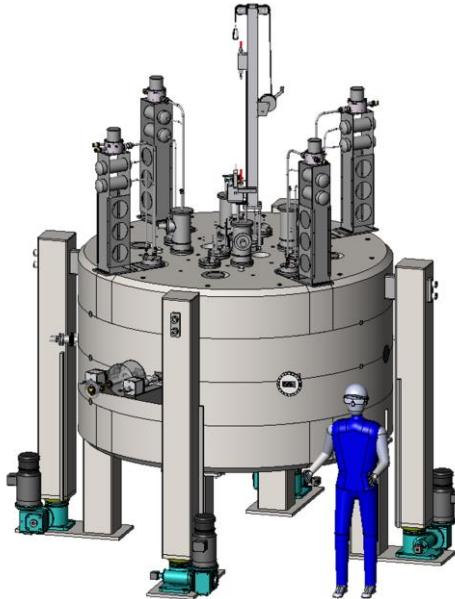


Рис. 23: Сверхпроводящий циклотрон Pronova K230.

#### **Циклотрон ION-12SC (Ionetix)**

Коллаборация сотрудников ОИЯИ и компании Ionetix (США) спроектировала и построила ультракомпактный сверхпроводящий циклотрон Ion-12SC для получения медицинских изотопов. Ускоритель превосходит по своим характеристика все существующие в мире машины этого класса. Благодаря применению уникальной технологии сверхпроводимости при кругосpirальной структуре полюсных накладок для формирования магнитного поля установка оказалась на порядок легче, в разы меньше по размерам, потребляемой мощности и стоимости по сравнению с аналогичными работающими машинами. Требуемая радиационная защита значительно уменьшена за счет использования внутренней мишени специальной конструкции. Обслуживание ускорителя осуществляется всего лишь одним человеком. По существу, был создан единственный в своем классе циклотрон, разработанный при определяющем вкладе сотрудников ОИЯИ<sup>[†]</sup>. На ускорителе в 2015 году экспериментально был получен пучок протонов с энергией 12.5 МэВ. Было организовано производство изотопа N<sup>13</sup>, применяемого в кардиодиагностике. В дальнейшем предполагается получение изотопа F<sup>18</sup>. Общий вес установки 2.3 тонны, что позволяет без проблем размещать его в клинике. Физический проект циклотрона был подготовлен в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова ОИЯИ за рекордно короткие сроки. Установка была изготовлена под руководством сотрудников корпорации Ionetix. Подготовка технической документации и изготовление частей ускорителя велись в тесном сотрудничестве с сотрудниками ЛЯП. На данный момент изготовлено три циклотрона, и еще три установки находятся в стадии создания. С 2016 года

\* 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.

† V. Smirnov, S. Vorozhtsov, J. Vincent, “Design study of an ultra-compact superconducting cyclotron for isotope production”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume 763, 1 November 2014, Pages 6–12.

один из ускорителей установлен и работает на регулярной основе в кардиологическом отделении медицинской школы при Мичиганском университете. Следующая машина планируется к установке в Сарасоте, Флорида, США. Существующие производственные мощности позволяют сооружать до 32 ускорителей такого типа ежегодно<sup>[‡]</sup>. Рис. 24 Рис. 25 помогут составить общее впечатление об ускорителе.



Рис. 24: Ускоритель в госпитале.

Циклотрон расположен внутри криостата. Установка использует уникальную технологию работы с холодным ярмом. При этом охлаждается весь магнит целиком за исключением части, расположенной между полюсными накладками.

---

<sup>‡</sup> J. Vincent, G. Blosser, G. Horner, K. Stevens, N. Usher, X. Wu, S. Vorozhtsov, V. Smirnov, “The Ionetix ION-12SC compact superconducting cyclotron for production of medical isotopes”, Proc. of Cyclotrons’16 Zurich, Switzerland, 2016.

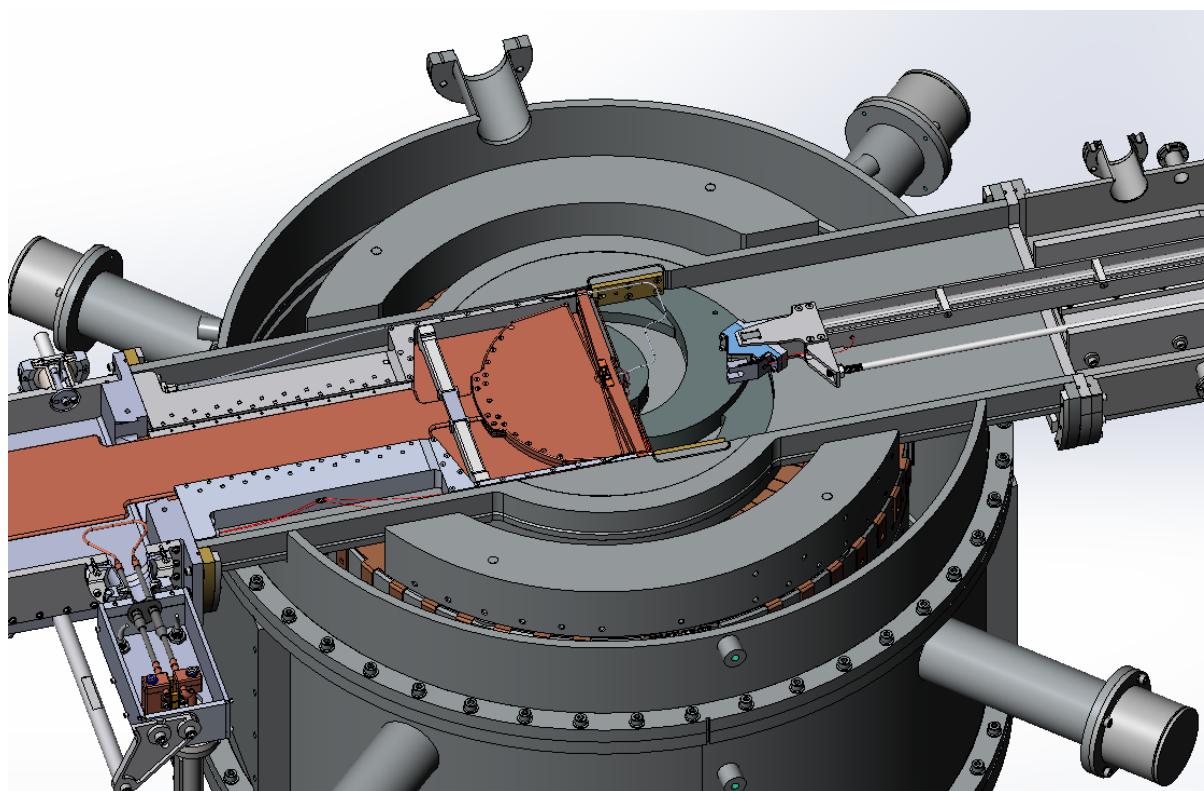


Рис. 25: Ускоряющая система состоит из одного классического 175- градусного дуанта с максимальным напряжением 17 кВ. Дуант в связке с противодуантной рамкой и источником помещается через специальный вырез в ярме в “теплую” часть установки.

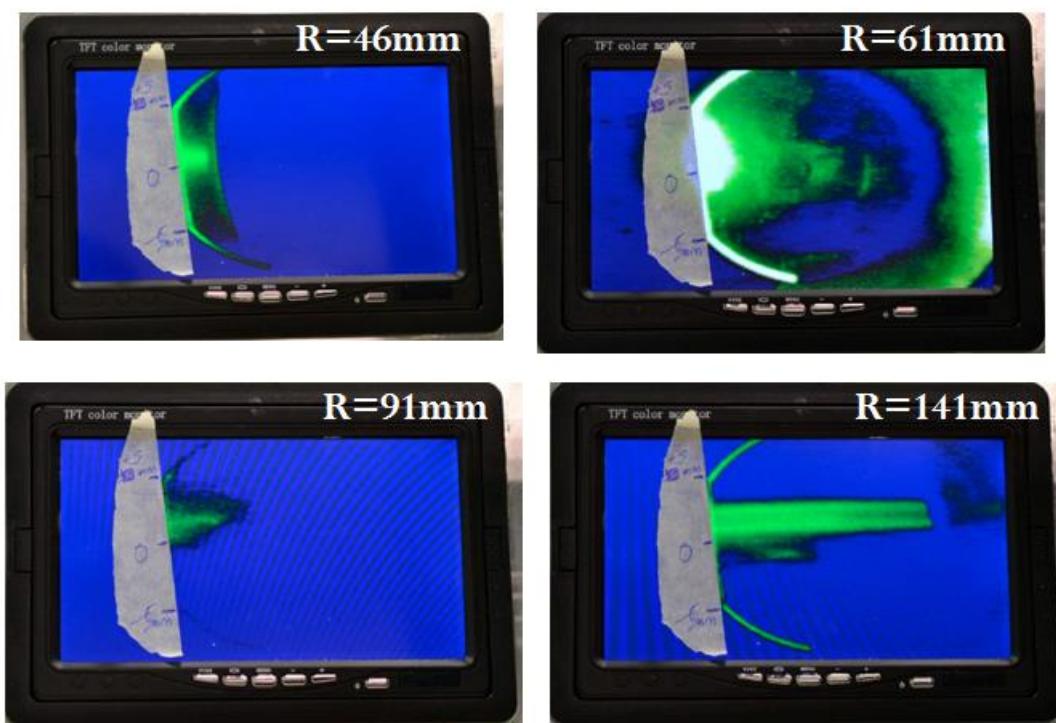


Рис. 26: ION-12SC вид пучка на пробнике.

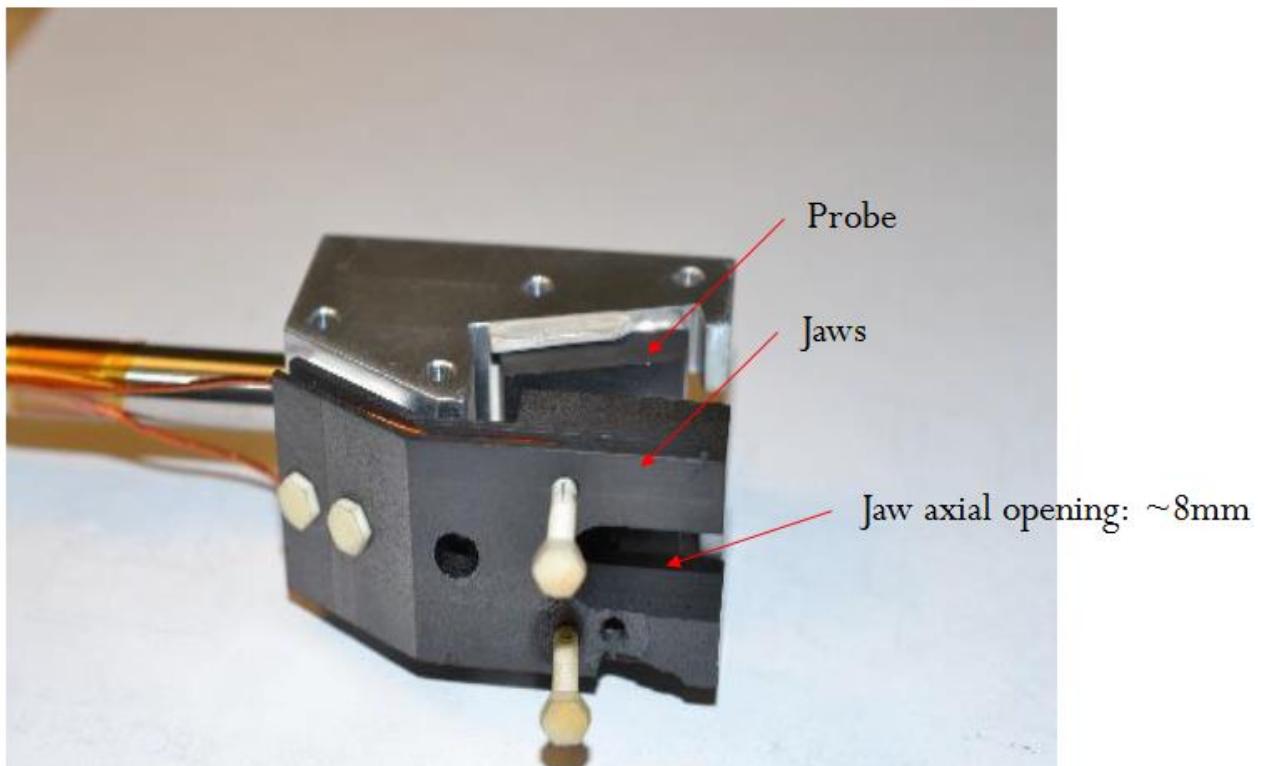


Рис. 27: Вид пробника циклотрона ION-12SC

#### ***Циклотронный комплекс для ускорения ионов углерода***

В настоящий момент выполнена начальная проработка конструкции сверхпроводящего секторного магнита<sup>§</sup> наряду со структурными элементами системы ввода пучка в бустерный циклотрон (Рис. 28). Магнитное поле достигает максимального значения  $\sim 6.4$  Тл в медианной плоскости секторного магнита на радиусе вывода для обеспечения необходимой изохронной карты поля установки. Особенностью магнита является использование радиального градиента магнитного поля, создаваемого наклоном сверхпроводящих обмоток. Дальнейшие разработки касаются создания механической модели магнита для изучения возможностей компенсации значительных электромагнитных усилий, возникающих в рассматриваемой структуре.

---

<sup>§</sup> V. Smirnov and S. Vorozhtsov, Magnetic System of a Superconducting Separated-Sector Cyclotron for Hadron Therapy, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 658–668. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017.

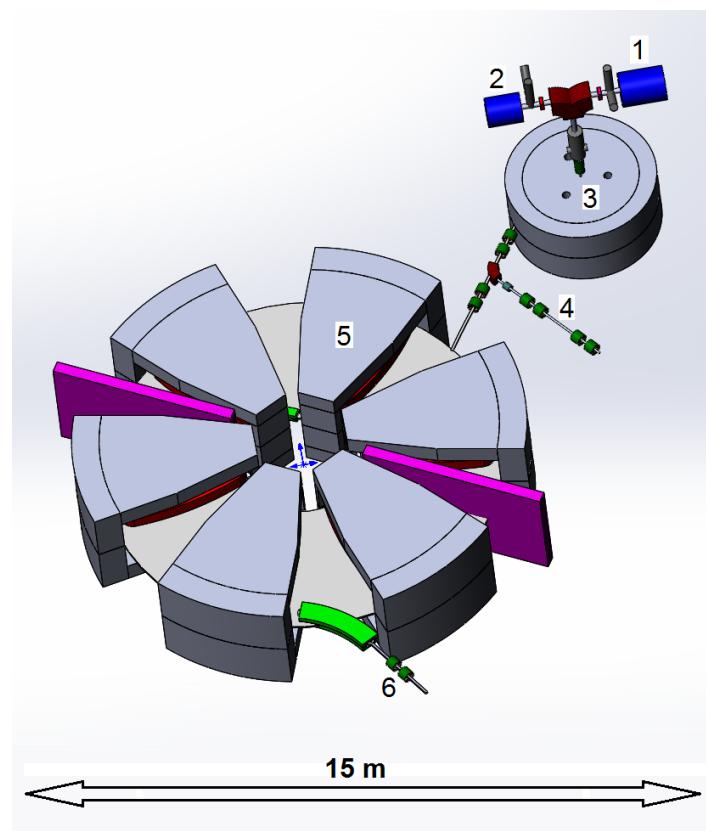


Рис. 28: Ускорительный комплекс, включающий циклотрон инжектор и бустер: 1 –  $^{12}\text{C}^{6+}$  ECR, 2 –  $\text{H}_2^+$  ECR, 3 – циклотрон инжектор, 4 – линия транспортировки (протоны и углерод 70 MeV/u), 5 – главный циклотрон, 6 – линия транспортировки (углерод 400 MeV/u).

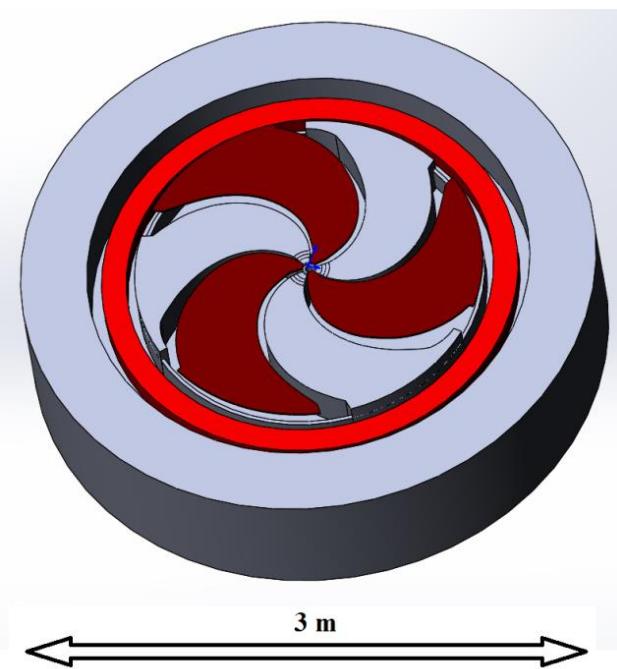


Рис. 29: Cyclotron-injector

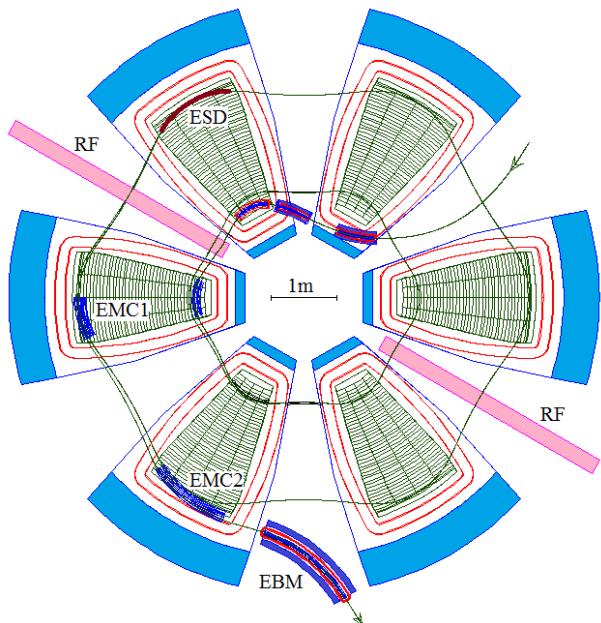


Рис. 30: Система вывода пучка из основного циклотрона: ESD – электростатический дефлектор, EMC1, EMC2 – пассивные магнитные каналы, EBM – поворотный магнит.

#### ***Увеличение энергии и коэффициента прохождения пучка для циклотрона RIKEN K-70***

Центральная область циклотрона RIKEN AVF была модифицирована для увеличения энергии пучка протонов и ионов  $M/Q = 2$ , были проведены тесты ускорения. Чтобы увеличить энергию пучка для удовлетворения потребностей пользователей в ядерной физике и производстве радиоизотопов, была разработана и выполнена (Рис. 31) модификация центральной области циклотрона [5]. При моделировании, эффективность захвата в ускорение в модифицированном центре не сильно отличалась от таковой для существующей структуры. При реальном ускорении мы успешно увеличили энергию пучка протонов от 14 МэВ до 30 МэВ. С другой стороны, эффективность прохождения при  $H = 2$  была ниже, чем до модификации. В дальнейшем мы проанализируем результаты тестов ускорения и пересмотрим структуру центральной области.



Рис. 31: Фото корпуса инфлектора.

### ***Публикации***

1. Modern compact accelerators of cyclotron type for medical applications V. L. Smirnov and S.B. Vorozhtsov, ISSN 1063-7796, Physics of Particles and Nuclei, 2016, Vol. 47, No. 5, pp. 863–883. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.
2. 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, Paul Scherrer Institute, PSI, and the Swiss Federal Institute of Technology, ETH, ETH Zürich, Switzerland. The Ionetix ION-12SC Compact Superconducting Cyclotron for Production of Medical Isotopes, John J Vincent, Gabe Fawley Blosser, Gary Steven Horner, Xiaoyu Wu, Victor Smirnov, Sergey Vorozhtsov, 2016.
3. 12th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology (ECAART12), Jyväskylä, 3–8 July 2016, University of Jyväskylä; 3–8 July 2016, Finland Approach for Realization of High Intensity Cyclotron Beam, Masao Nakao, Satoru Hojo, Ken Katagiri, Akinori Sugiura, Takashi Wakui, Akira Noda, Nobuyuki Miyahara, Koji Noda, Victor L. Smirnov, Sergey B. Vorozhtsov, Akira Goto, 2016.
4. 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications, Paul Scherrer Institute, PSI, and the Swiss Federal Institute of Technology, ETH, ETH Zürich, Switzerland. A Coupled Cyclotron Solution for Carbon Ions Acceleration, Victor Smirnov, Sergey Vorozhtsov, 2016.
5. S. B. Vorozhtsov, V. Smirnov, and A. Goto., “Modification of the central region in the RIKEN AVF cyclotron for acceleration at the H=1 RF harmonic,” in *Proc. Cyclotrons'10*, Sept. 2010, pp. 138–140.