

Система выпуска пучка многозарядных ионов из циклотрона

© Ю.Н. Гавриш, А.В. Галчук, Д.В. Кирцев, Ю.К. Осина, Ю.И. Стогов

АО „НИИЭФА“ им. Д.В. Ефремова,
196641 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

Поступило в Редакцию 6 сентября 2022 г.
В окончательной редакции 23 декабря 2022 г.
Принято к публикации 24 декабря 2022 г.

В АО „НИИЭФА“ разработан проект и начато изготовление циклотрона для ускорения многозарядных ионов до энергии, регулируемой в широком диапазоне 7.5–15 MeV/nuc. Электромагнит имеет Ш-образную форму. Ускоряющая система состоит из двух дуантов, расположенных в „долинах“. Ускорение ведется на четных гармониках. Ионы инжектируются из внешних источников вдоль аксиального канала. Применена классическая система вывода с помощью дефлектора и магнитных каналов.

Ключевые слова: циклотрон, выпуск пучка многозарядных ионов, отношение массы к заряду, электростатический дефлектор, пассивный магнитный канал, магнитный канал из постоянных магнитов, эмиттанс пучка, градиент индукции.

DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54507.217-22

Введение

Циклотрон многозарядных ионов предназначен для ускорения ионов, имеющих отношение массы к заряду $A/Z = 3-7$ (C_{12}^{+3} , O_{16}^{+4} , O_{18}^{+3} , Ne_{20}^{+5} , Si_{28}^{+6} , Ar_{40}^{+10} , Fe_{56}^{+14} , Kr_{84}^{+18} , Ag_{107}^{+22} , Xe_{136}^{+23} , Bi_{209}^{+43}) в диапазоне энергий 7.5–15 MeV/nuc. [1]. Разрабатываемый циклотрон многозарядных ионов (МЗИ) будет превосходить существующие в настоящее время циклотроны ионов DC-280, DC-60, DC-140 как по диапазону регулирования энергии, так и по номенклатуре ускоряемых ионов [2–9]. Наиболее близкими по характеристикам, широкому набору ускоряемых ионов и имеющих один и тот же диаметр полюса является циклотрон У-400М, модернизация циклотрона У-400, созданного в 1978 г., и циклотрон DC-280, запущенный в эксплуатацию в 2019 г. (ОИЯИ, Дубна) [2,10,11]. Однако данные циклотроны значительно уступают циклотрону МЗИ по весовым характеристикам, кроме того, циклотрон DC-280 имеет более узкий диапазон регулирования энергий. Циклотрон многозарядных ионов впервые обеспечит ускорение и выпуск пучков ионов висмута высокой зарядности от +35 до +43. Разнообразие ионов, диапазон изменения их энергии и интенсивности обеспечивают условия проведения широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований, в том числе для решения ряда технологических задач. Разработка комплекса многозарядных ионов, включающего в себя циклотрон с системой внешней инжекции, систему формирования и транспортировки пучков ускоренных ионов, систему облучения образцов и обеспечивающие системы была начата в 2020 г. [1]. Диапазон плотности потока ионов на облучаемом объекте составит

$10^2-10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Проектный ток пучка из источника для разных ионов — до $40 \mu\text{A}$. Число камер облучения — 3. В настоящей работе представлены результаты моделирования системы выпуска пучка многозарядных ионов из циклотрона.

В таблице приведены результаты расчета граничных режимов ускорения требуемых ионов [9]. Для легких ионов возможно получение более высоких энергий $\sim 30 \text{ MeV/nuc}$.

Выпуск пучков ускоренных ионов из циклотрона предполагается осуществлять с помощью дефлектора и системы магнитных каналов.

Электростатический дефлектор с угловой протяженностью 37° устанавливается в „долине“, свободной от дуантов. Электрическое поле дефлектора отклоняет ионы, обеспечивая выход пучка за пределы полюса электромагнита. Рабочий потенциал на высоковольтной пластине — до 100 kV при зазоре между электродами порядка 7 mm. При максимальном потенциале возможен выпуск легких ионов с повышенной энергией, приходящейся на нуклон.

1. Система магнитных каналов циклотрона многозарядных ионов

Система магнитных каналов состоит из трех частей. Для коррекции градиента краевого магнитного поля на траектории выпущенного пучка используется первая часть, которая служит для фокусировки отклоненного дефлектором пучка ускоренных ионов сразу же после выхода пучка из сектора в краевое поле циклотрона. Пучок ионов, проходя в области

Граничные режимы ускорения ионов

Элемент	Заряд	Индукция в центре, Т	Энергия, MeV/nucl.
Bi ₂₀₉	35	1.29	7.28
	43	1.6	16.94
Xe ₁₃₆	23	1.29	7.43
	28	1.56	16.12
Ag ₁₀₇	18	1.29	7.35
	21	1.6	15.41
Kr ₈₄	14	1.29	7.21
	18	1.5	16.5
Fe ₅₆	9	1.41	7.53
	11	1.6	15.44
Ar ₄₀	6	1.46	7.5
	10	1.29	16.2
Si ₂₈	4	1.5	7.18
	6	1.49	15.93
	9	1.42	32.1
Ne ₂₀	3	1.43	7.19
	4	1.56	15.22
	6	1.43	27.9
O ₁₈	3	1.33	7.11
	4	1.46	15.44
O ₁₆	3	1.29	9
	3	1.6	13
	5	1.42	32.1
C ₁₂	2	1.29	7.21
	3	1.29	16.23
	4	1.42	34.4

резко спадающего по радиусу краевого поля циклотрона, претерпевает дефокусировку в горизонтальной плоскости и перефокусировку в вертикальной плоскости. Без использования магнитного канала невозможно получить разумные размеры пучка на выходном фланце циклотрона в обеих плоскостях. Первая часть представлена в виде двух ферромагнитных брусков, расположенных параллельно отклоненной траектории симметрично выше и ниже медианной плоскости. Расчетное значение положительного радиального градиента магнитного поля, вносимого брусками, составляет не менее 16 Т/м, в средней зоне при максимальном

режиме работы циклотрона (МДС основной обмотки 700 kA-turn).

Вторая и третья части представляют собой наборы из четырех постоянных магнитов, образующих квадрупольную линзу. Необходимый градиент индукции магнитного поля ~ 10 Т/м.

Диаметр полюса электромагнита — 4 м [9]. Пассивная часть магнитного канала изготавливается из стали 10 и устанавливается в соответствие с ходом траектории, отклоненной дефлектором.

Отклоненная траектория — это траектория заряженной частицы, стартующей с равновесной орбиты, для которой на азимуте расположения дефлектора включается ослабление магнитного поля на величину $\Delta B = (E/0.3) \cdot \beta$, где ΔB — ослабление индукции магнитного поля, [G]; E — напряженность электрического поля, [kV/cm]; β — относительная скорость частицы.

Координаты траекторий рассчитываются путем интегрирования уравнений движения заряженной частицы в медианной плоскости расчетного магнитного поля циклотрона МЗИ.

Величина напряженности электрического поля дефлектора выбирается такой, чтобы отклоненная частица попала на середину выходного фланца циклотрона.

Для оценки величины магнитного поля, вносимого намагниченными брусками 1-й части (пассивной) системы магнитных каналов, был выполнен расчет для минимального и максимального уровня МДС электромагнита циклотрона многозарядных ионов. Для компенсации, вносимой в область ускорения пучка 1-й гармоники от магнитного поля стальных брусков, вторая идентичная пара брусков установлена на азимуте 180° от первой. Расчетная 3D-модель 1/2 части электромагнита с магнитным каналом (МК) и компенсатором К-МК1 (С-МCh1) показана на рис. 1.

Вертикальное сечение МК1 (корректор градиента) с указанием границ полюса магнита и секторов, а так-

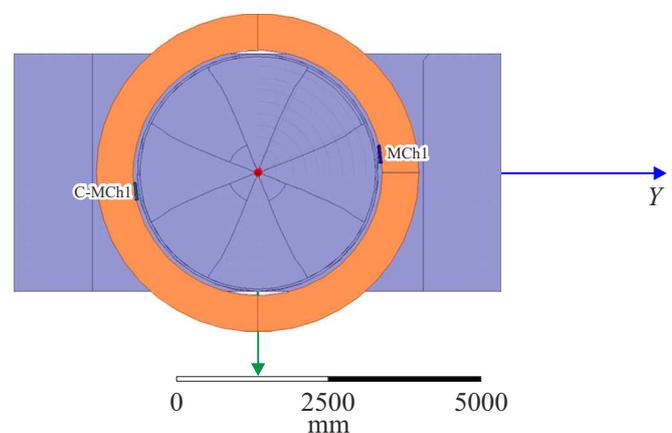


Рис. 1. Расчетная 3D-модель 1/2 части электромагнита с МК1 (MCh1) и компенсатором К-МК1 (С-MCh1), вид сверху.

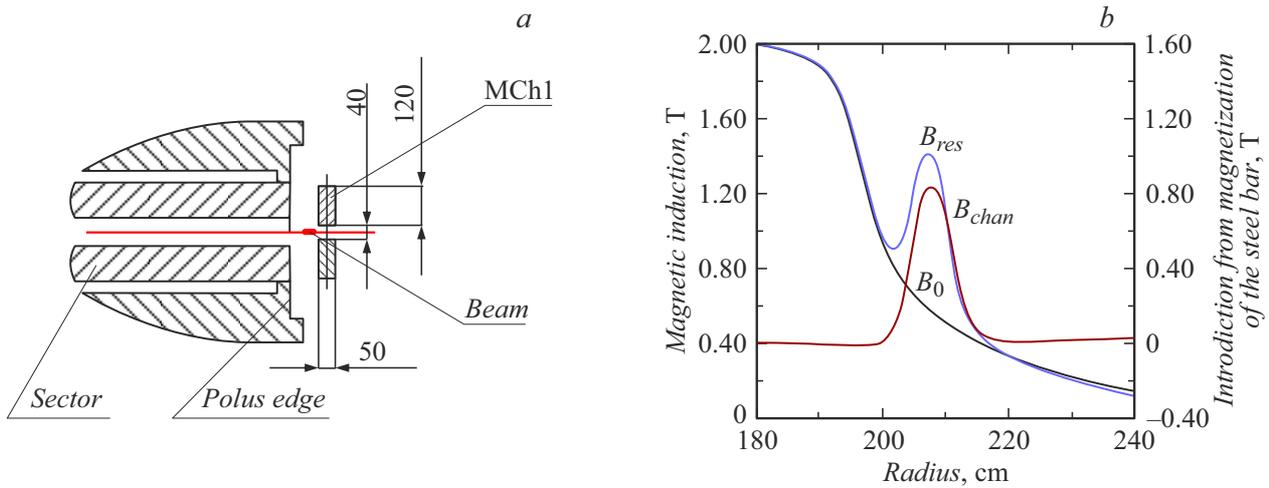


Рис. 2. Вертикальное сечение МК1 (MCh1) с указанием границ полюса, сектора и пучка (*a*) и радиальное распределение магнитного поля от стального бруска для азимута, на котором ось бруска лежит на радиусе 208 см (*b*); B_0 — магнитное поле без бруска; B_{res} — магнитное поле с внесенным бруском; B_{chan} — разница в магнитных полях (магнитное поле, внесенное намагниченным бруском).

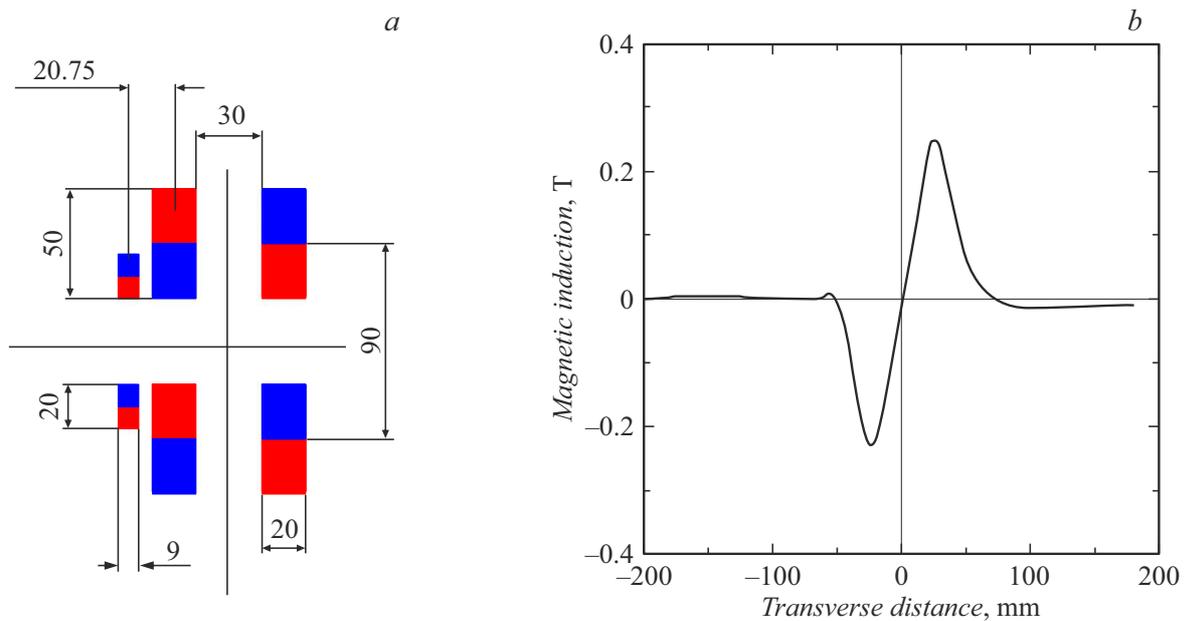


Рис. 3. Вертикальное сечение частей 2 и 3 (каналы из постоянных магнитов), полярность магнитов показана для 2-й части, радиально-фокусирующей (*a*); распределение магнитного поля в медианной плоскости по радиусу (*b*).

же рассчитанное радиальное распределение магнитного поля от стального бруска для азимута, на котором ось бруска лежит на радиусе 208 см, представлено на рис. 2.

Для определения оптимального азимутально-радиального положения стальных брусков 1-й части магнитного канала циклотрона МЗИ был сделан расчет методом случайного поиска, по которому был определен минимум размеров пучка на входе во вторую часть магнитного канала (из постоянных магнитов) при условии попадания отклоненной траектории на середину выходного

фланца циклотрона. Магнитное поле, вносимое брусками, при этом синтезировалось по величине индукции исходного поля в местоположении точки оси бруска на данном азимуте. В результате было получено оптимальное местоположение 1-й части магнитного канала.

Части 2 и 3 МК представляют собой квадрупольные линзы, составленные из четырех постоянных магнитов, отличающихся порядком чередования полярности магнитов [12]. Материал постоянных магнитов — $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Коэрцитивная сила — 820–860 кА/м.

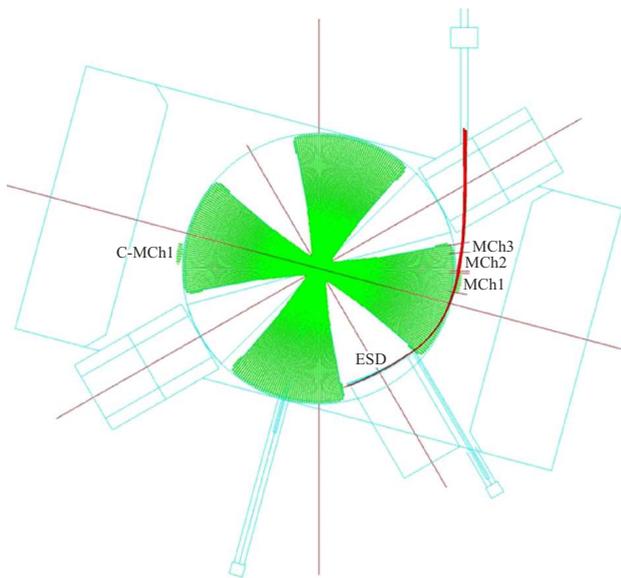


Рис. 4. Траектория выпущенного пучка ионов Xe^{+23}_{136} на входе в ионопровод системы транспортировки пучка циклотрона МЗИ в режиме 330 kA-turn (ESD — электростатический дефлектор; MCh1 — магнитный канал 1; C-MCh1 — компенсатор магнитного канала 1; MCh2, MCh3 — радиально-фокусирующий и вертикально-фокусирующий магнитные каналы из постоянных магнитов).

В результате численного моделирования определены размеры постоянных магнитов, обеспечивающих градиент $\sim 10 \text{ T/m}$. Вертикальное сечение частей 2 и 3 (каналы из постоянных магнитов) и распределение маг-

нитного поля в медианной плоскости представлено на рис. 3.

2. Расчет выпуска пучка ионов

Результаты расчетов выпуска пучка ионов Xe^{+23}_{136} в магнитном поле 330 kA-turn (7.5 MeV/nucl) и ионов Bi^{+43}_{209} с системой магнитных каналов в режиме 700 kA-turn (15 MeV/nucl) представлены далее. Для обеспечения размеров пучка в пределах апертуры в центре первого квадрупольного дублета системы транспортировки циклотрона МЗИ, вторая и третья части МК варьировались по длине. Вычисления проводились в расчетном магнитном поле с установленной 1-й частью МК на двух уровнях магнитного поля — верхней и нижней границах диапазона регулирования. Поскольку постоянные магниты не оказывают влияния на распределение поля основного магнита (материал постоянных магнитов характеризуется $\mu = 1$), поле от магнитного канала просто добавлялось к основному полю. В качестве начальных условий на входе пучка частиц в дефлектор были приняты максимальные амплитуды колебаний — 5 mm по вертикальной и горизонтальной координатам, разброс по энергии $\pm 0.5\%$. Коэффициент выпуска пучка с помощью дефлектора стандартный, не хуже 50%.

Рассчитанная траектория отклоненного пучка, нанесенная на план размещения циклотрона, показана на рис. 4.

Рассчитанные значения горизонтального и вертикального эмиттансов внешнего пучка ионов Xe^{+23}_{136} на выходном фланце циклотрона МЗИ в магнитном поле 330 kA-turn представлены на рис. 5 и 6.

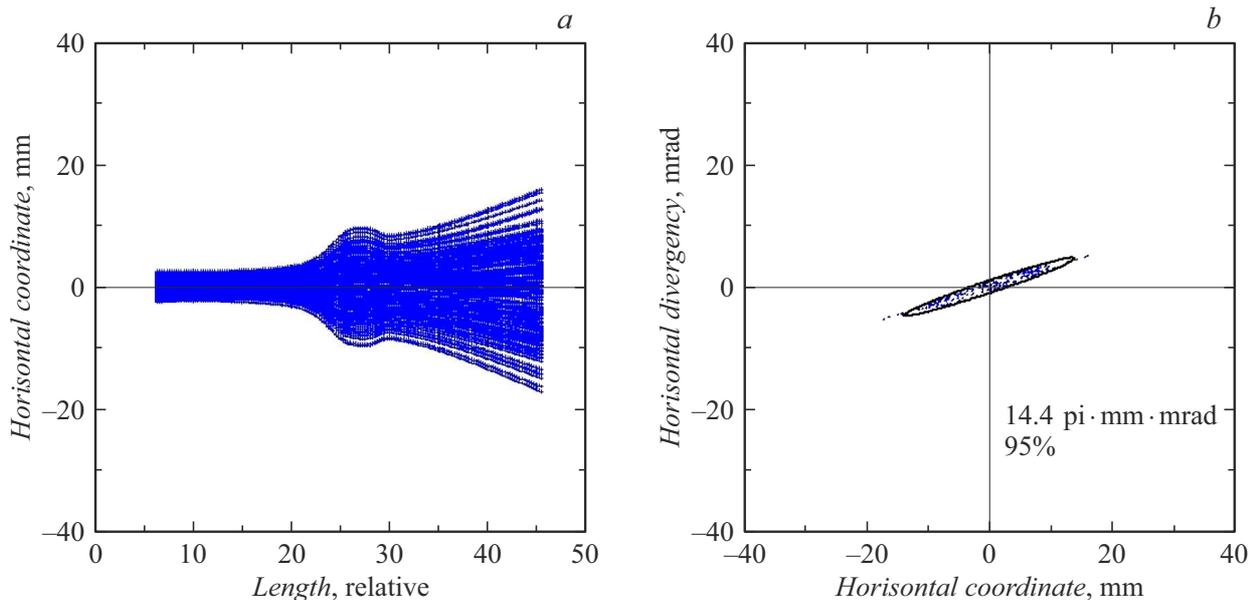


Рис. 5. Горизонтальная огибающая пучка ионов Xe^{+23}_{136} от входа в дефлектор до выходного фланца (a) и эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости на выходном фланце циклотрона (b).

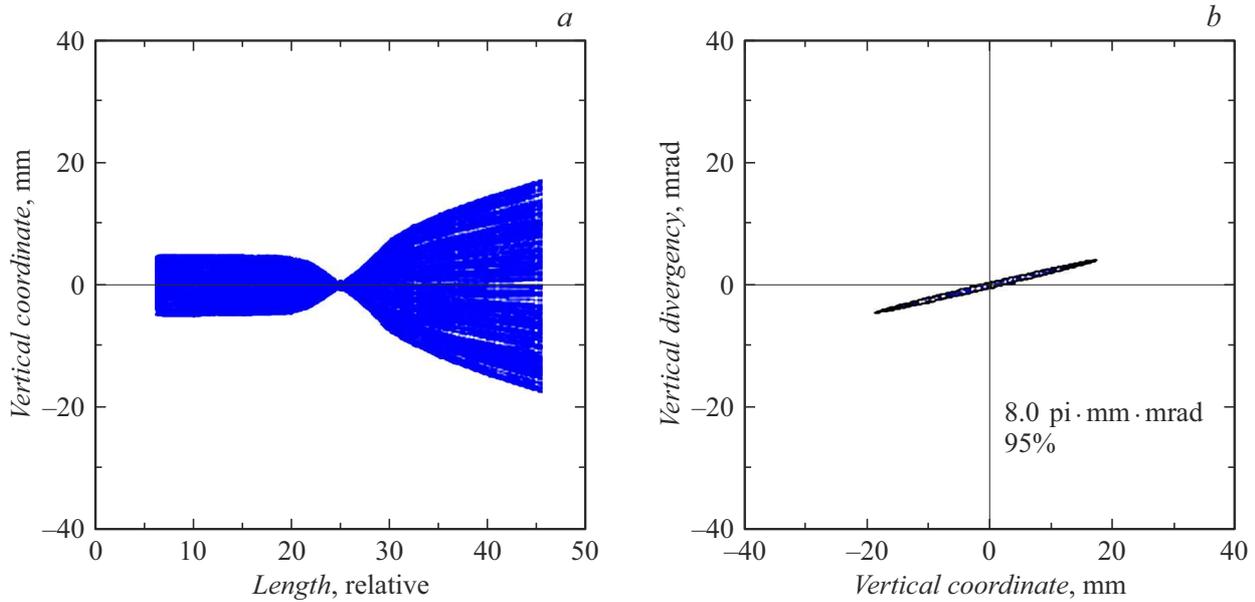


Рис. 6. Вертикальная огибающая пучка ионов Xe_{136}^{+23} от входа в дефлектор до выходного фланца (a) и эмиттанс пучка в вертикальной плоскости на выходном фланце циклотрона (b).

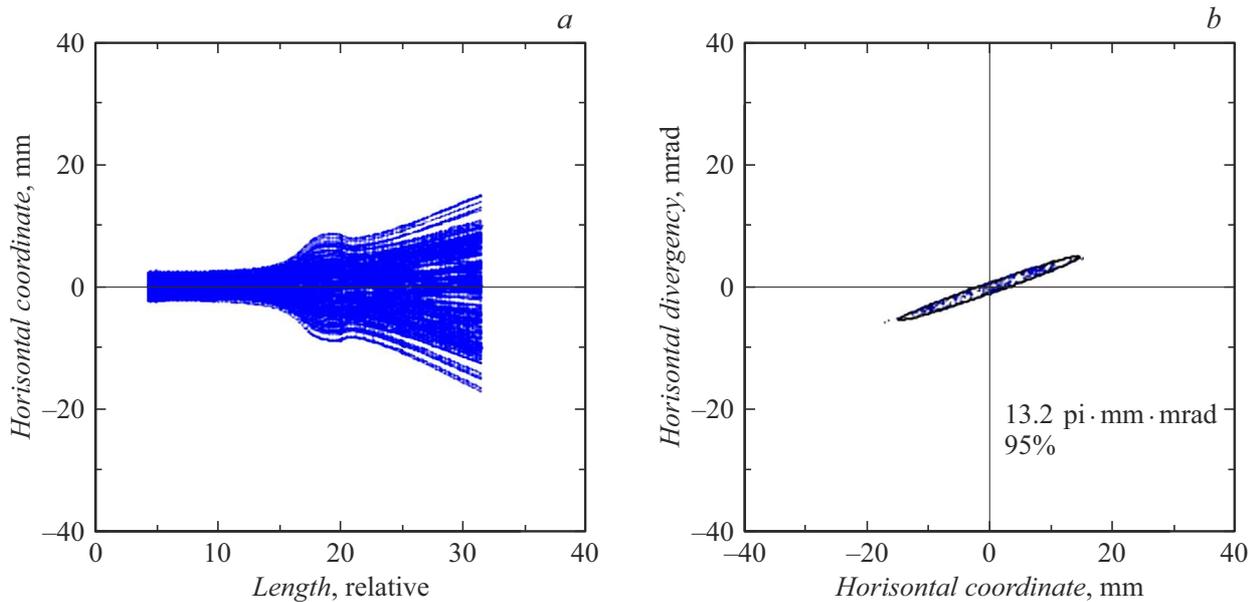


Рис. 7. Горизонтальная огибающая пучка ионов Bi_{209}^{+43} от входа в дефлектор до выходного фланца (a) и эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости на выходном фланце циклотрона (b).

Аналогичные расчеты были выполнены и для ионов Bi_{209}^{+43} для максимального режима работы циклотрона, соответствующего 700 kA-turn в основной обмотке и энергии 15 MeV/nucl соответственно. Напряженность электрического поля на дефлекторе при выпуске ионов Bi_{209}^{+43} будет составлять ~ 150 kV/cm. Графики огибающих отклоненного пучка, а также горизонтальный и вертикальный эмиттансы внешнего пучка

ионов Bi_{209}^{+43} на выходном фланце циклотрона МЗИ в магнитном поле 700 kA-turn приведены на рис. 7 и 8.

Разработана конструкторская документация для изготовления электростатического дефлектора и магнитного канала. Конструкторская модель дефлектора представлена на рис. 9. Продолжается изготовление составных частей дефлектора и магнитного канала.

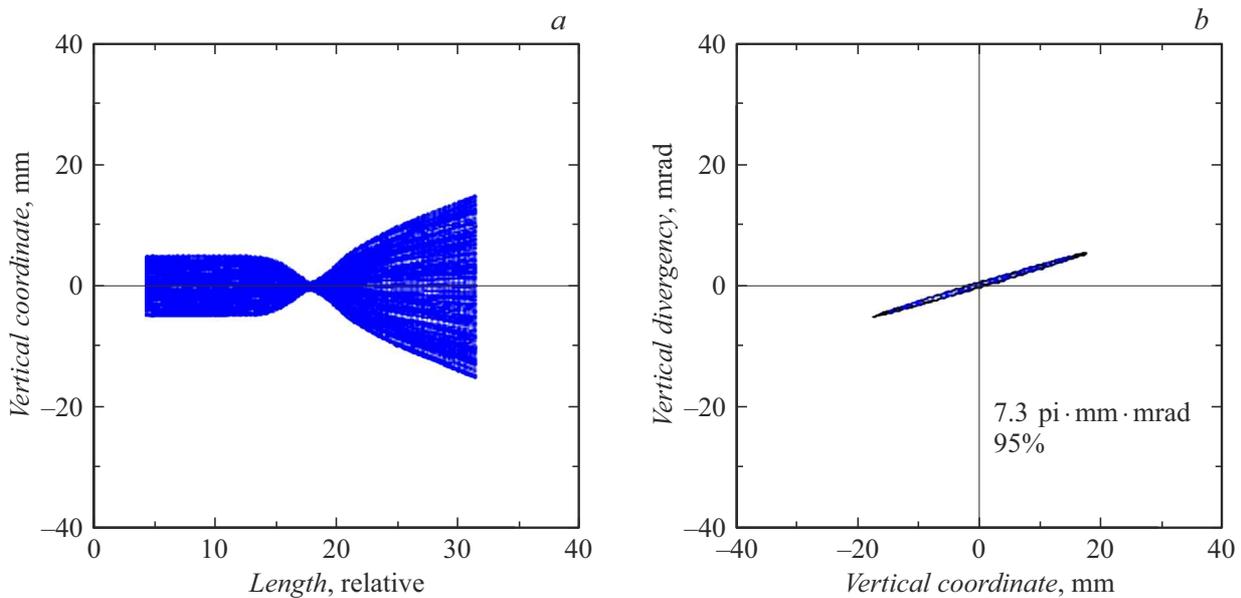


Рис. 8. Вертикальная огибающая пучка ионов Bi_{209}^{+43} от входа в дефлектор до выходного фланца (а) и эмиттанс пучка в вертикальной плоскости на выходном фланце циклотрона (b).

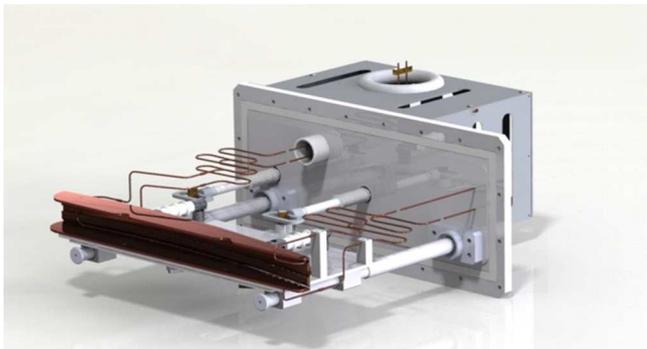


Рис. 9. 3D-модель дефлектора.

Заключение

В результате численного моделирования определены параметры устройств системы вывода для выпуска пучка ионов C_{12}^{+3} , O_{16}^{+4} , O_{18}^{+3} , Ne_{20}^{+5} , Si_{28}^{+6} , Ar_{40}^{+10} , Fe_{56}^{+14} , Kr_{84}^{+18} , Ag_{107}^{+22} , Xe_{136}^{+23} , Bi_{209}^{+43} с отношением $A/Z = 3-7$ в диапазоне регулирования энергий $7.5-15 \text{ MeV/nuc}$, что позволит минимизировать потери пучка при выпуске из циклотрона. Эмиттанс пучка ионов Xe_{136}^{+23} на выходном фланце циклотрона МЗИ для минимальной энергии 7.5 MeV/nuc в горизонтальной/вертикальной плоскости составил $14.4/8\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (95%), ионов Bi_{209}^{+43} для максимального режима работы циклотрона, соответствующего энергии 15 MeV/nuc — $13.2/7.3\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$. Циклотрон МЗИ обеспечит ускорение легких ионов Si_{28}^{+9} , Ne_{20}^{+6} , O_{16}^{+5} , C_{12}^{+4} до энергий $\sim 30 \text{ MeV/nuc}$. Таким образом, разрабатываемый АО „НИИЭФА“ циклотрон многозарядных ионов впервые обеспечит ши-

рокий диапазон регулирования энергии и выпуск пучков многозарядных ионов вплоть до висмута высокой зарядности (+43). Максимальная напряженность электрического поля на дефлекторе не будет превышать 150 kV/cm .

В настоящее время активно ведется работа по изготовлению всего технологического оборудования циклотрона многозарядных ионов.

Финансирование работы

Работа финансировалась в рамках реализации государственного контракта с ГК „Росатом“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ю.К. Осина, Ю.Н. Гавриш, А.В. Галчук, С.В. Григоренко, В.И. Григорьев, Р.М. Клопенков, Л.Е. Королев, К.А. Кравчук, А.Н. Кужлев, И.И. Межов, В.Г. Мудролюбов, К.Е. Смирнов, Ю.И. Стогов, М.В. Усанова. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции (РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 15–18 июня 2021), с. 5.
- [2] Г.Г. Гульбемян, С.Н. Дмитриев, М.Г. Иткис, Ю.Ц. Оганесян, Б.Н. Гикал, И.В. Калагин, В.А. Семин, С.Л. Богомолов, В.А. Бузмаков, И.А. Иваненко, Н.Ю. Казаринов, Н.Ф. Осипов, С.В. Пашенко, В.А. Соколов, Н.Н. Пчелкин, С.В. Прохоров, М.В. Хабаров, К.Б. Гикал. Письма в ЭЧАЯ, **16** (6(225)), 653 (2019).

- [3] G.G. Gulbekian, S.N. Dmitriev, Yu.Ts. Oganessian, B.N. Gikal, I.V. Kalagin, V.A. Semin, S.L. Bogomolov, I.A. Ivanenko, N.Yu. Kazarinov, G.N. Ivanov, N.F. Osipov. *Phys. Particles and Nuclei Lett.*, **15**, 809 (2018).
<https://doi.org/10.1134/S1547477118070373>
- [4] B. Gikal, S. Dmitriev, P. Apel, S. Bogomolov, O. Borisov, V. Buzmakov, G. Gulbekyan, I. Ivanenko, O. Ivanov, M. Itkis, N. Kazarinov, I. Kalagin, I. Kolesov, A. Papash, S. Pashchenko, A. Tikhomirov, M. Khabarov, K. Katyrzhanov, A. Tuleushev, A. Borisenko, S. Lysukhin, V. Aleksandrenko, V. Dektyaryov, V. Dzyubin, M. Koloberdin, K. Kuterbekov, A. Ushakov. *Phys. Particles and Nuclei Lett.*, **5** (7), 642 (2008).
DOI: 10.1134/S1547477108070248
- [5] Б.Н. Гикал, Г.Г. Гульбекян, О.Н. Борисов, А.М. Ломовцев, В.Б. Зарубин, И. А. Иваненко, Н.Ю. Казаринов, В.И. Казача, В.П. Кухтин, Е.В. Ламзин, В.Н. Мельников, С.В. Пашченко, Е.В. Самсонов, О.В. Семченкова, С.Е. Сычевский, Й. Франко. *Формирование магнитного поля циклотрона DC-60* (Препринт ОИЯИ Р9-2006-151), p. 30.
- [6] И.А. Иваненко, Г.Г. Гульбекян, Н.Ю. Казаринов, И.В. Калагин, Й. Франко. *Письма в ЭЧАЯ*, **17**(4(229)), 463 (2020).
- [7] M. Zdorovets, I. Ivanov, M. Koloberdin, S. Kozin, V. Alexandrenko, E. Sambaev. *Proceed. of RuPAC2014, Obninsk, Kaluga Region, Russia*, p. 287.
- [8] A. Ivanenko, G.G. Gulbekyan, N.Yu. Kazarinov, I.V. Kalagin, J. Franko. *Phys. Particles and Nuclei Lett.*, **17**(4), 473 (2020).
DOI:10.1134/S1547477120040202
- [9] Yu.K. Osina, A. Akimova, A.V. Galchuck, Yu.N. Gavrish, S.V. Grigorenko, V.I. Grigoriev, M.L. Klopenkov, R.M. Klopenkov, L.E. Korolev, K.A. Kravchuk, A.N. Kuzhlev, I.I. Mezhev, V.G. Mudrolyubov, K.E. Smirnov, Yu.I. Stogov, S.S. Tsygankov, M.V. Usanova. *RuPAC2021, Alushta, Russia. 27th Russian Particle Acc. Conf.*, P. 96.
DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRA02
- [10] S. Mitrofanov, B. Gikal, G. Gulbekyan, I. Kalagin, V. Skuratov, Y. Teterev, N. Osipov, S. Paschenko, V. Anashin. *Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, Russia*, p. 152.
- [11] B. Gikal, I. Kalagin, G. Gulbekyan, S. Dmitriev. *Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada FR5REP099*, p. 5011.
- [12] W. Kleeven, S. Lucas, J.-L. Delvaux, F. Swoboda, S. Zarembo, W. Beeckman, D. Vandeplasseche, M. Abs, Y. Jongen. *NUKLEONIKA*, **48** (Supplement 2), 59 (2003).