

3-мерная математическая модель оптимизации центральных электродов циклотрона

Е. Е. Перепелкин

*Лаборатория физики высоких энергий
Объединенный институт ядерных исследований
ул. Жолио-Кюри, д.6, г. Дубна, Московская обл., 141980, Россия*

Работа посвящена оптимизации геометрии центральных электродов циклотрона методом обратной трассировки пучка. В качестве электрического поля ускоряющих зазоров используются 3-мерные карты полей, полученные численным образом. Положение ускоряющих зазоров определяется путем минимизации функционала, зависящего от набора энергии частиц при прохождении ускоряющего зазора. В результате моделирования получена оптимальная геометрия центральной области циклотрона VINCY для ускорения четырех типов ионов.

Ключевые слова: оптимизация центральной области циклотрона, динамика пучка.

1. Введение

Постановка задачи связана с проблемой построения структуры ускоряющих электродов в центральной области компактного циклотрона (рис. 1). При этом рассматривается циклотрон, рассчитанный на ускорение нескольких видов ионов. Таким образом, необходимо найти общую геометрию центральных электродов, которая будет оптимальна для всех режимов ускорения. Магнитное поле такой установки для всех режимов считается сформированным и, следовательно, известно.

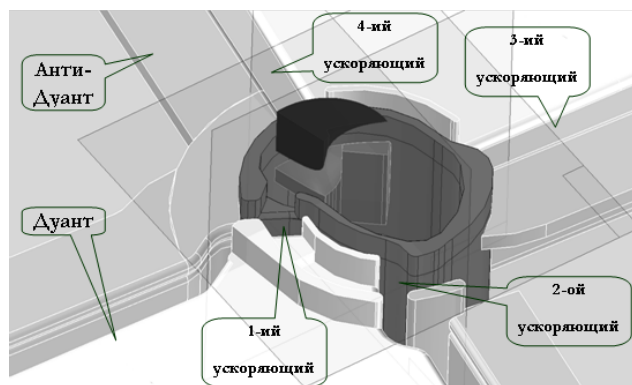


Рис. 1. Геометрия центральной зоны циклотрона

2. Общее описание метода

Идея метода состоит в построении неким способом (каким именно будет сказано ниже) «оптимальной» центральной зоны электродов для каждого режима ускорения. Далее, путем «суперпозиции» полученных геометрических структур, создается общая, оптимальная для всех режимов ускорения, геометрия центральной зоны.

На практике иногда один режим ускорения бывает важнее другого. В этом случае построение «суперпозиции» геометрических структур приходится корректировать в сторону более важного с практической точки зрения режима.

В качестве критерия выбора центральной геометрии электродов используется условие хорошего центрирования центральной траектории пучка. Поэтому построение геометрической структуры для каждого режима производится на основе так называемого метода «обратной трассировки» (backward tracking) [1]. Таким образом, считается, что геометрия дуанта вне центральной зоны известна и, следовательно, известно создаваемое им электрическое поле. Такое предположение вполне обоснованно, так как в реальности угловой размер дуанта определяется доступным свободным местом между секторами магнитной системы и частотой электрического поля (ВЧ), на которой планируют ускорять данный ион.

Далее, с некоторого конечного (близкого к зоне вывода) радиуса R при соответствующей данному радиусу энергии частицы E , пускается ион. В качестве начального азимутального положения частицы берется центр дуанта, так как для этой точки известна стартовая ВЧ фаза, равная 90° , и радиальный момент $Rr \approx 0^\circ$ частицы. Ион пускается против направления ускоренного движения иона. Таким образом, ион будет двигаться к центру по спирали, понижая свою кинетическую энергию при каждом прохождении теперь уже замедляющего зазора. В результате, сделав некое конечное число оборотов, ион дойдет до центральной зоны, где ему останется сделать несколько оборотов, например, два или три, и войти в корпус инфлектора.

Задача состоит в том, чтобы подобрать положение и параметры замедляющих (ускоряющих) зазоров таким образом, чтобы в корпус инфлектора пришел ион с нужной энергией, равной энергии инжекции, и чтобы для него существовал инфлектор с конструктивно приемлемыми параметрами.

В тех случаях, когда не удается решить задачу вариацией параметров замедляющих (ускоряющих) промежутков, в качестве варьируемого параметра будем использовать начальную энергию иона. Однако стоит помнить, что сильное изменение начальной энергии ведет к ухудшению центрирования. Иногда бывают случаи, когда энергия инжекции допускает вариацию в некоторых пределах. Такая ситуация предпочтительней, так как она позволяет сохранить центрирование.

3. Создание базы данных полей ускоряющих промежутков

Как было сказано выше, в центральной области циклотрона карта электрического поля будет формироваться за счет полей ускоряющих промежутков, располагаемых определенным образом. На практике из-за сложной геометрической структуры ускоряющего зазора невозможно найти аналитически карту распределения электрического поля в таком зазоре. Есть публикации, например [2], в которых даются аппроксимации простейших геометрий. Для задачи построения оптимальной трехмерной геометрии центральной области требуется иной уровень реалистичности карты электрического поля ускоряющего зазора. Получение аналитических аппроксимаций таких карт полей видится весьма затруднительным. Поэтому было принято решение о создании расчетных базы данных (БД) таких карт полей, характеризующихся следующими параметрами:

- тип ускоряющего зазора (с вертикальными перегородками или без них);
- величина ускоряющего зазора.

Примеры таких ускоряющих зазоров приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 показан ускоряющий зазор с вертикальными перегородками, а на рис. 3 такой же зазор, но без перегородок.

Вертикальные перегородки используются для концентрации электрического поля внутри ускоряющего зазора. Использование ускоряющих зазоров типа рис. 2 бывает важным на первых оборотах, так как энергия пучка еще мала и необходимо, чтобы пучок как можно быстрее набрал энергию и ушел из центральной области циклотрона.

Перед началом численного моделирования проводится расчет набора структур ускоряющих зазоров с различными параметрами. В результате получаются

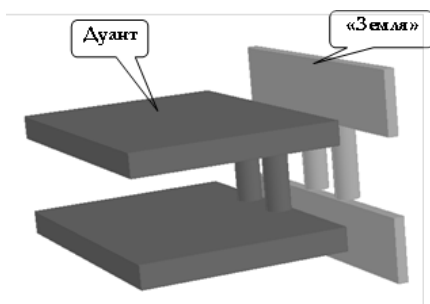


Рис. 2. Структура с вертикальными перегородками

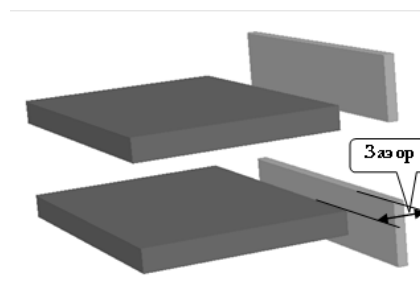


Рис. 3. Структура без перегородок

трехмерные карты электрического поля. На рис. 4, 5 приведены модули распределения таких полей в медианной плоскости. Распределение поля на рис. 4 соответствует геометрии рис. 2, а распределение на рис. 5 относится к структуре рис. 3. Изменение цвета на рис. 4, 5 характеризует степень неоднородности поля. Так, например, на рис. 5 в центральной области проходит однотонная вертикальная полоса, что соответствует однородному полю в ускоряющем зазоре без перегородок (рис. 3). На рис. 4, напротив, виден сильный перепад в цветовой гамме в окрестности вертикальных перегородок (четыре круга).

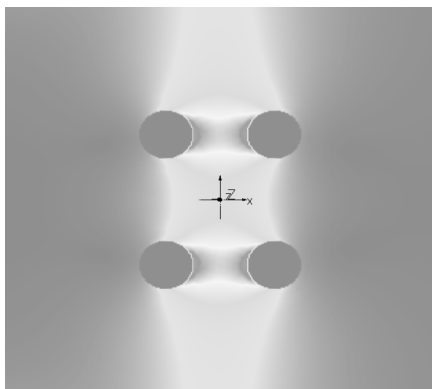


Рис. 4. Распределение электрического поля для структуры с перегородками

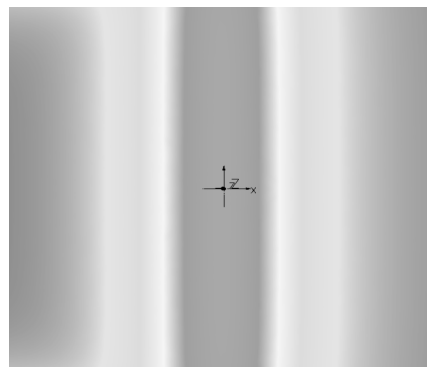


Рис. 5. Распределение электрического поля для структуры без перегородок

Если в процессе моделирования требуется карта поля с промежуточным (не посчитанным) значением величины ускоряющего зазора, тогда производится интерполяция по соседним картам полей, соответствующим соседним значениям этого параметра. Отметим, что при создании БД величина шага сетки параметра (величины зазора) выбиралась специальным образом. Вызвано это тем, что распределение электрического поля, соответствующего структуре с перегородками, имеет резкий фронт спада (роста), особенно вблизи перегородок (см. рис. 4). Такое поведение электрического поля требует плавного изменения параметра величины ускоряющего зазора. В случае структуры рис. 4 поле имеет более плавный профиль (см. рис. 5), что дает возможность увеличить шаг сетки величины ускоряющего зазора.

4. Выбор оптимального положения ускоряющих зазоров

Итак, будем считать, что проведена процедура «обратной трассировки» и при этом рассматриваемой частице осталось совершить два оборота до входа в инфлектор. Положение такой частицы определяется следующим образом:

- считаем, что по азимуту частица находится в долине магнитной системы (но не внутри дуанта), рис. 6;
- энергия частицы $E \leq E_n$, где $E_n = E_{inj} + 4n \cdot U_{Dec}Z$, $n = 2$.

Здесь использованы обозначения: n — число оборотов, оставшихся совершить частице до попадания в корпус инфлектора; E_{inj} — энергия инжекции частицы; U_{Dec} — потенциал на дуанте, Z — заряд иона. Считается, что на одном обороте присутствуют 4 ускоряющих зазора (см. рис. 6). На рис. 6 показан частный случай, когда необходимо подобрать положения только двух последних ускоряющих зазоров.

После того как положение частицы найдено (см. рис. 6), задается начальное положение ускоряющих зазоров и их параметры. Отметим, что такое начальное положение можно задать, исходя из общих физических соображений. Например, зная гармонику ВЧ поля, при которой ускоряется ион, и величину частоты ускоряющего поля, можно определить оптимальный угловой размер дуанта в смысле максимального набора энергии частицей. Такую же процедуру можно повторить для каждого иона и выбрать усредненный по всем частицам оптимальный размер дуанта. При этом необходимо учитывать геометрические ограничения, такие как наличие свободного места между секторами магнита.

Исходя из величины потери (набора) энергии частицы при прохождении через замедляющий (ускоряющий) зазор, происходит выбор положения и параметров самого зазора. Параметры зазора, по которым производится оптимизация, следующие:

- величина ускоряющего зазора G ;
- положение центра ускоряющего зазора в полярной системе координат (R_C, Φ_C) циклотрона;
- угол наклона ускоряющего зазора φ по отношению к радиус вектору R_C ;
- тип зазора $T = 0, 1$ (0 — без перегородок, 1 — с перегородками).

На рис. 7 показаны координаты центра ускоряющего зазора (R_C, Φ_C) и угол наклона зазора φ .

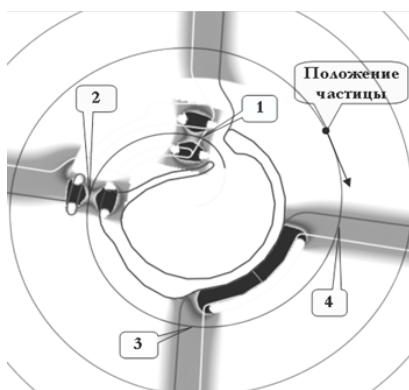


Рис. 6. Положение частицы после процедуры «обратной трассировки»

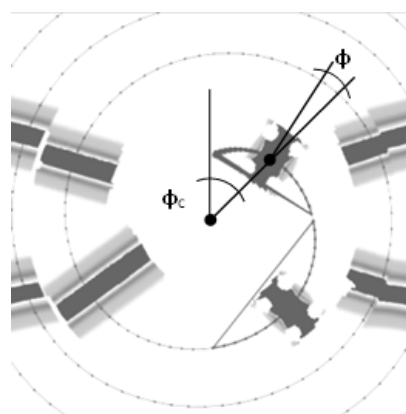


Рис. 7. Координаты ускоряющего зазора

Для выбора оптимальных параметров зазора производится минимизация следующего функционала:

$$F(\vec{p}) = |\Delta W(\vec{p}) - \Delta W_{max}|, \quad p = \{G, R_C, \Phi_C, \varphi, T\}, \quad (1)$$

где \vec{p} — вектор параметров, ΔW_{\max} — максимально возможный набор энергии на ускоряющем зазоре, например:

$$\Delta W_{\max} = Z \cdot U_{\text{Dee}}. \quad (2)$$

Функция $\Delta W(\vec{p})$ находится численно путем интегрирования уравнений движения. В результате минимизации функционала (1) будет получено положение ускоряющего зазора. Такой процесс последовательно повторяется для каждого зазора, пока частица не доходит до корпуса инфлектора. Иногда последний ускоряющий (или первый, если считать из центра) требует дополнительной настройки с целью лучшего сопряжения с центральной траекторией инфлектора. Задача сопряжения траектория инфлектора с траекторией циклотрона решается по методу, описанному в работе [3].

Также при построении геометрии центральной области желательно использовать как можно меньше ускоряющих зазоров с перегородками с целью уменьшения возможных потерь частиц. Однако полностью обойтись без перегородок, как правило, не удастся из-за необходимости быстрого набора энергии. Поэтому параметр T , отвечающий за тип зазора, часто является фиксированным.

Диапазон изменения параметра G зависит от конкретной установки. С точки зрения оптимизации процесс минимизации функционала (1) будет стремиться уменьшить величину зазора G . Однако на практике слишком маленький зазор при определенном напряжении на дуанте может привести к электрическим пробоям. Так как создаваемая геометрия центральной области будет использоваться на нескольких ускоряющих режимах, которым соответствуют разные напряжения на дуантах, то минимальная величина зазора должна быть определена изначально.

5. Результаты моделирования и оптимизации

Рассмотрим данный алгоритм на примере построения структуры электродов в центральной области циклотрона VINCY (Белград, Сербия) [4] для четырех режимов ускорения ионов: H^- , ${}^2H^+$, ${}^4He^+$, ${}^{40}Ar^{6+}$. Для решения задачи выполнялась процедура оптимизации для каждого режима ускорения. На рис. 8 приведена промежуточная конфигурация, которая получилась в результате оптимизации. На рис. 8а дано распределение электрического поля, составленного из модельных ускоряющих зазоров. По карте поля рис. 8а была построена геометрия электродов, для которой было посчитано электрическое поле рис. 8б.

Из сравнения рис. 8а и рис. 8б видно, что есть область, в которой карты полей существенно отличаются. Такая разница дает другое поведение траектории пучка. Поэтому при оптимизации геометрии электродов необходимо задавать допустимые области изменения положения центров ускоряющих зазоров и их наклон. Для исправления ситуации (см. рис. 8) второй (от центра) ускоряющий зазор был смещен, как показано на рис. 9, для достижения плавности центральной линии ускоряющего зазора. Как видно из рис. 9а, траектория возле второго зазора проходит почти через вертикальную перегородку, что приведет к почти полной потере пучка. В случае, изображенном на рис. 9б, такой проблемы уже нет, и центральная траектория идет строго по центру ускоряющего зазора, между вертикальными перегородками.

На рис. 10 показан набор всех оптимальных положений ускоряющих зазоров (прямоугольники) для каждого из четырех режимов ускорения. По этим четырем конфигурациям ускоряющих зазоров была выбрана суммарная конфигурация положения ускоряющих зазоров, обозначенных черным цветом. Исходя из положений зазоров (суммарной конфигурации), нарисована геометрия центральных электродов, изображенная на рис. 10, а также на рис. 11 в трехмерном случае. Для геометрии рис. 11 было посчитано электрическое поле [5], распределение которого в медианной плоскости дано на рис. 9б.

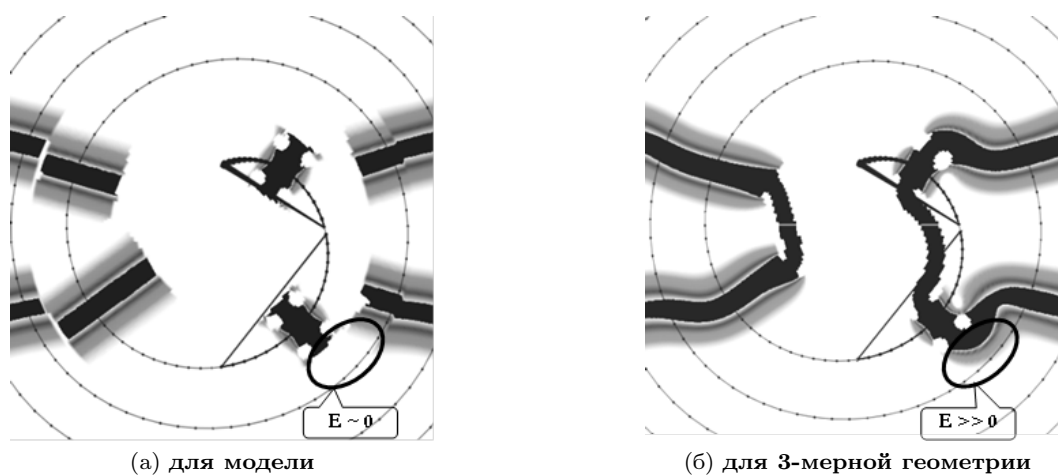


Рис. 8. Разница в электрическом поле

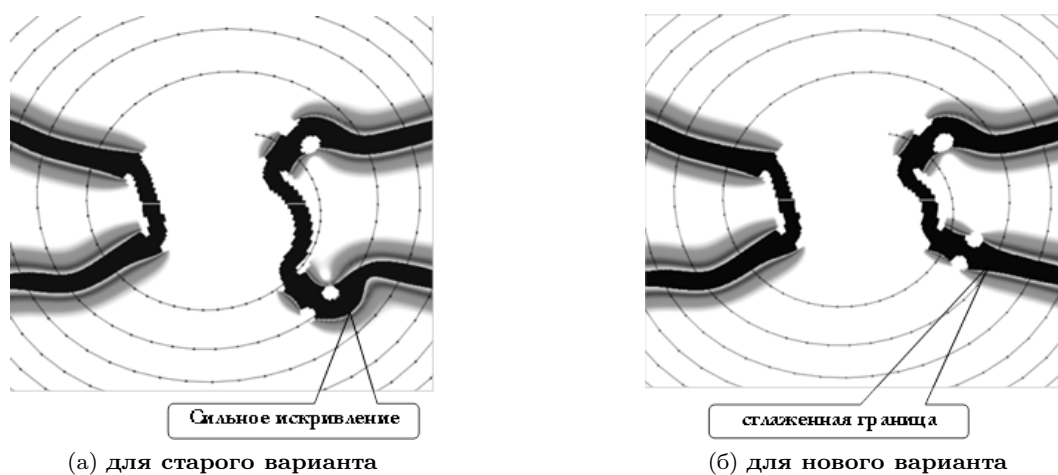


Рис. 9. Распределение поля

Далее делается «сшивка» двух карт электрического поля. Первая карта поля соответствует центральной области ускорителя (см. рис. 9б). Вторая карта поля соответствует так называемому «ускорительному» диапазону, т.е. области, где частица получает основной набор энергии. Именно в ускорительном диапазоне использовалась процедура «обратной трассировки».

На рис. 12 показано сравнение новой и старой геометрии центральных электродов. Особенностью новой конфигурации (рис. 12б) является то, что она почти полностью получена при помощи автоматического алгоритма оптимизации и при этом, как будет показано ниже, имеет ряд преимуществ перед старым вариантом (рис. 12а).

Далее для выбранной оптимальной геометрической структуры центральных электродов с соответствующей картой электрического поля выполнялось моделирование движения пучка для четырех режимов ускорения с использованием программы СВДА [6]. При этом обращалось особое внимание на качество центрирования пучка на выводном радиусе и количество потерь частиц на новой геометрической структуре.

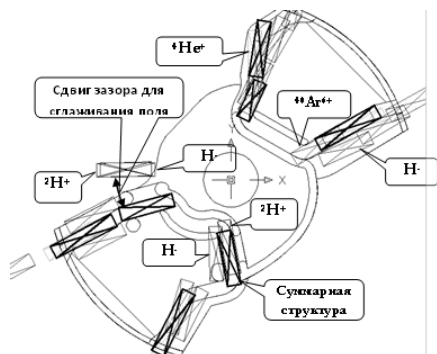


Рис. 10. Построение геометрии центральных электродов

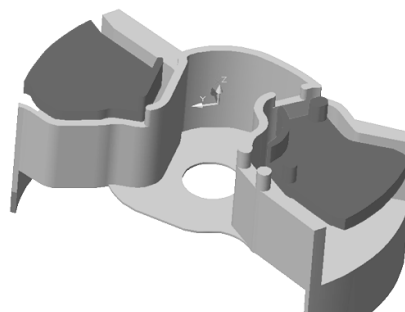


Рис. 11. Оптимизированный вариант 3-мерной геометрии центральных электродов

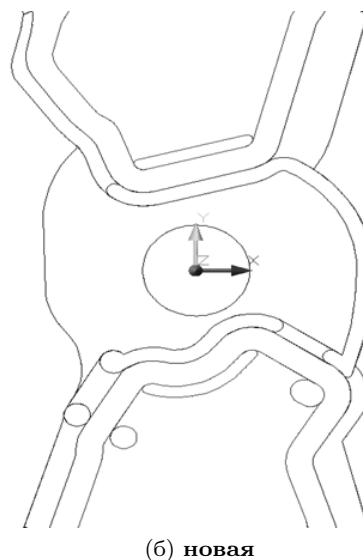
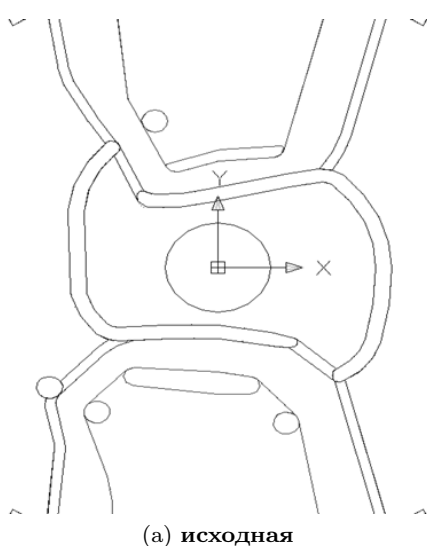


Рис. 12. Конфигурация центральной зоны

На рис. 13 показан процесс прохождения банчей через центральную область ускорителя для различных режимов ускорения: H^- , ${}^2H^+$, ${}^4He^+$, ${}^{40}Ar^{6+}$. На рис. 14 приведены осцилляции радиальной амплитуды для режимов H^- , ${}^2H^+$, ${}^4He^+$, ${}^{40}Ar^{6+}$.

Графики строились следующим образом. Пускалась центральная траектория, потом на некотором радиусе и азимуте (радиус перебирался с шагом ~ 10 см, а азимут брался: 0° , 90° , 180° , 270°) частица останавливалась и «отключалось» ускоряющее поле, после чего частица пускалась дальше. Сделав полный оборот частица возвращалась на данный азимут, но уже в другую точку и с другим углом Pr . Далее шел следующий оборот с «выключенным» электрическим полем до тех пор, пока в фазовом пространстве (r, Pr) частица не описывала замкнутый эллипс. После этого делалось измерение ширины этого эллипса, что и являлось радиальной амплитудой на данном радиусе и данном азимуте. В результате для каждого режима построено четыре графика радиальных амплитуд, соответствующих разным азимутам. Из рис. 14 видно, что при приближении к конечному радиусу радиальная амплитуда выходит на стабильное плато.

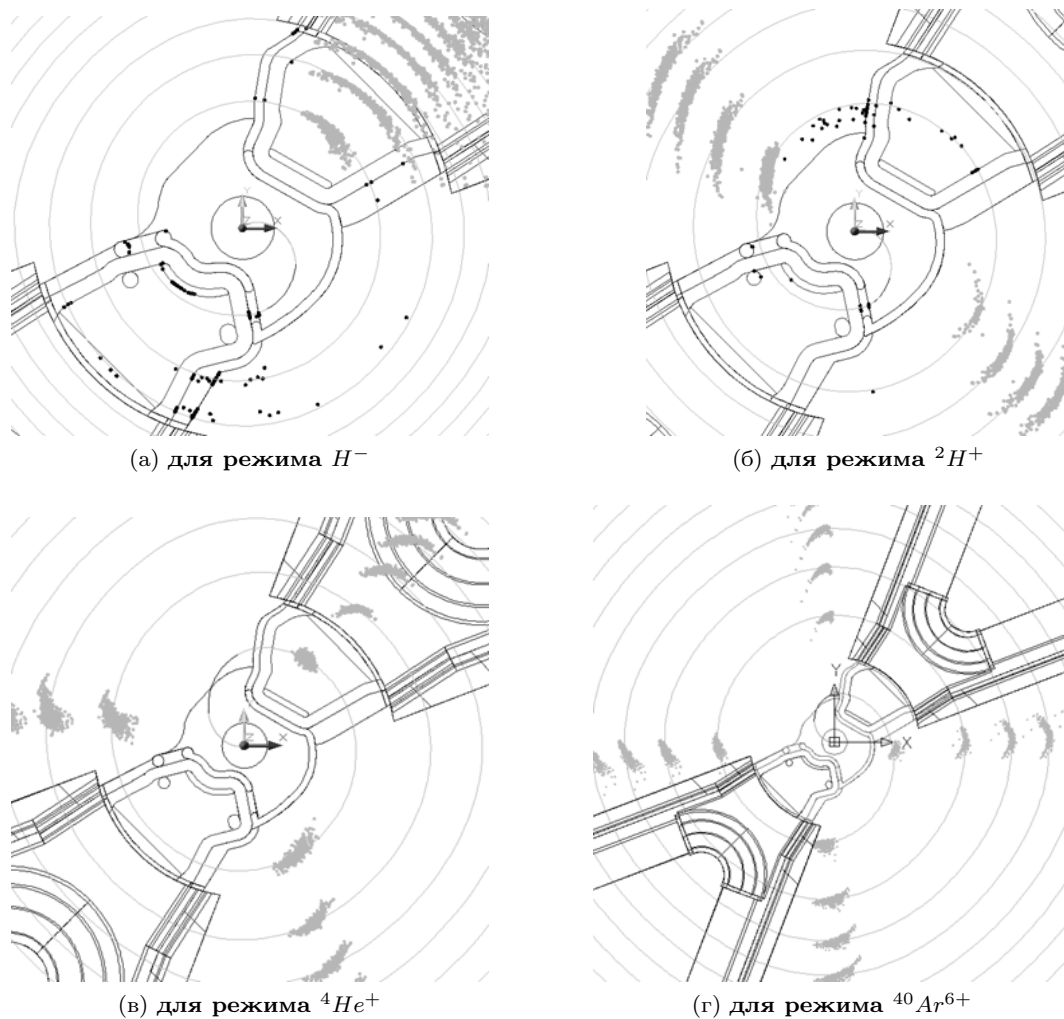
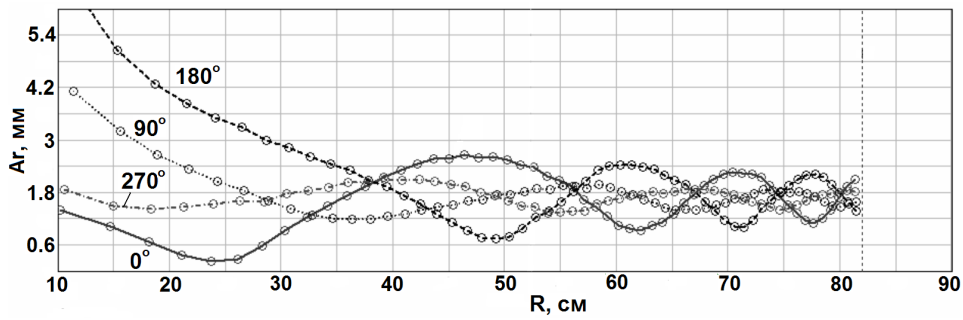


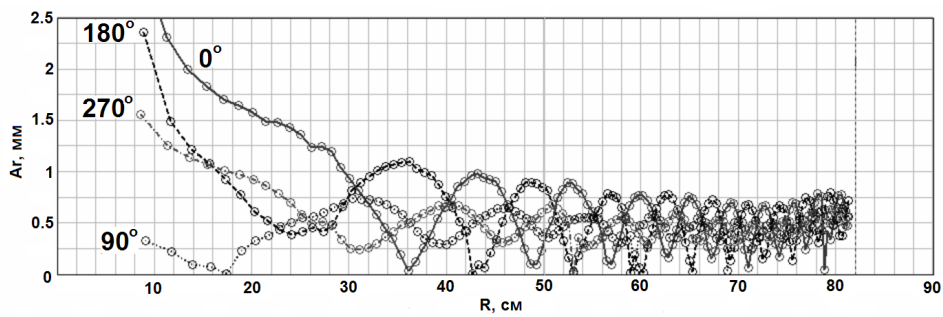
Рис. 13. Ускоренные банчи и потерянные частицы

На рис. 15 приведены графики ВЧ фазы в центре дуанта 1 и дуанта 2. В принципе, за пределами центральной зоны центр дуанта частица должна проходить в фазе 90° ВЧ. На рис. 15 показана такая фаза, из которой для удобства вычтено 90° ВЧ. Следовательно по данным графикам можно судить об эффективности ускорения вне центральной зоны. Из рис. 15 видно, что во всех четырех случаях ВЧ фаза отличается от оптимальной в пределах от 5° – 10° ВЧ, что указывает на хороший набор энергии на ускоряющих зазорах.

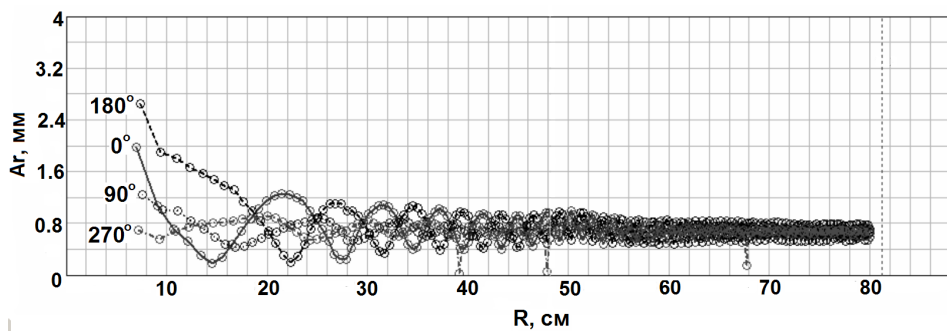
В табл. 1 дано сравнение старой (см. рис. 12а) и новой (см. рис. 12б) конфигурации по величине потерь частиц и по качеству центрирования F_R для всех четырех режимов ускорения. Как видно из табл. 1, новая и старая конфигурации имеют похожее качество центрирования для режимов H^- , ${}^2H^+$, ${}^4He^+$, однако для режима ${}^{40}Ar^{6+}$ качество центрирования новой конфигурации существенно выше. С точки зрения количества потерь частиц пучка на структурных элементах, также картина в пользу новой конфигурации. Так, для режима ${}^2H^+$ потери уменьшились больше чем в полтора раза, для режима ${}^4He^+$ уменьшились более чем в два раза, а для режима ${}^{40}Ar^{6+}$ вместо 65% стало 0%.



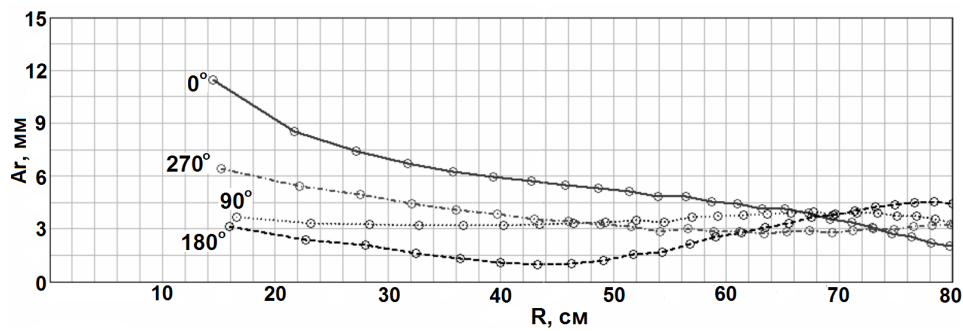
(а) для режима H^-



(б) для режима $^2H^+$



(в) для режима $^4He^+$



(г) для режима $^{40}Ar^{6+}$

Рис. 14. Осцилляции радиальной амплитуды

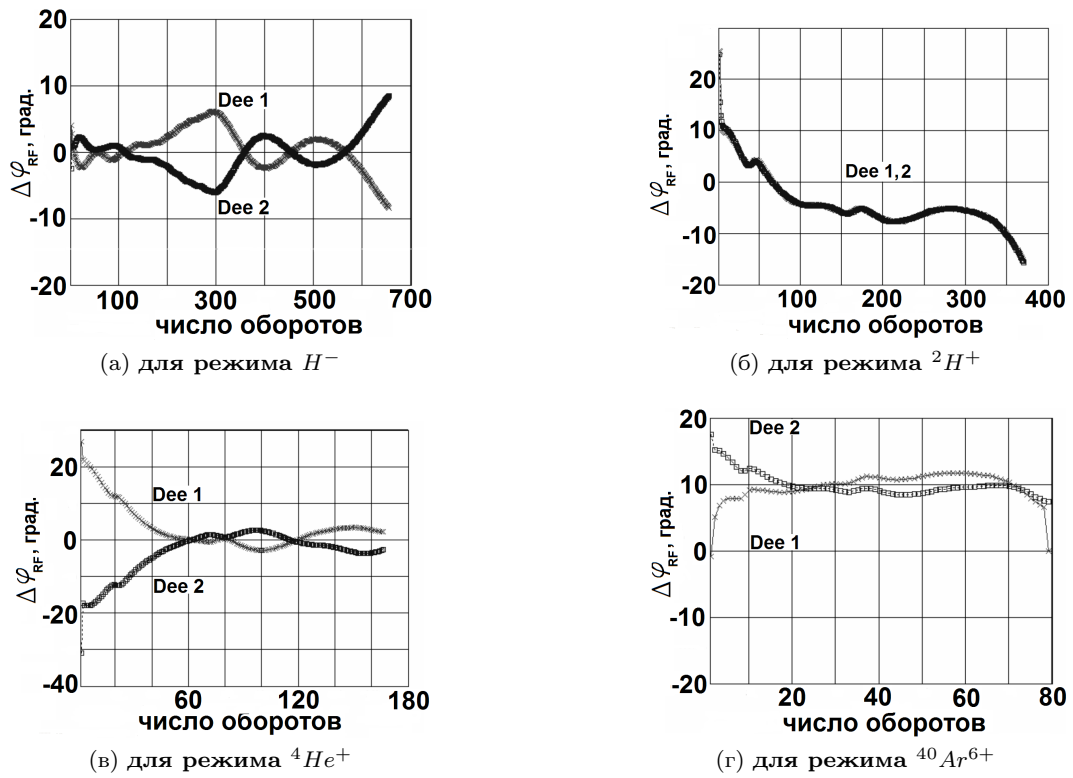


Рис. 15. ВЧ фаза центральной траектории в центре дуанта

На рис. 16 приведены центральные траектории для всех четырех режимов в центральной области ускорения.

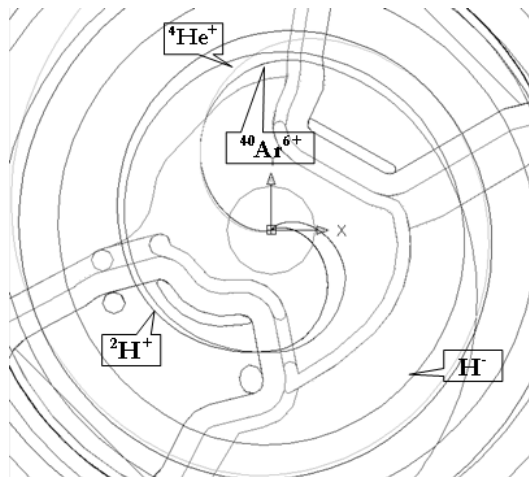


Рис. 16. Центральные траектории всех режимов

Сравнение конфигураций

Режимы	Старая конфигурация		Новая конфигурация	
	потери, [%]	F_R , [мм]	потери, [%]	F_R , [мм]
H^-	39	0,9	31	0,6
$^2H^+$	42	0,5	25	0,5
$^4He^+$	14	1,5	6	1,8
$^{40}Ar^{6+}$	65	8,4	0	3

Литература

1. *Chautard F.* Beam Dynamics for Cyclotrons. — CERN, 2006-012. — P. 209.
2. *Hazewindus N. et al.* The Magnetic Analogue Method as used in the Study of a Cyclotron Central Region // Nuclear Instruments and Methods. — 1974. — Vol. 118. — Pp. 125–134.
3. *Жидков Е. П., Перепелкин Е. Е., Ворожцов С. Б.* Моделирование спирального инфлектора и центрирования орбит в компактном циклотроне // Математическое моделирование. — 2007. [*Zhidkov E. P., Perepelkin E. E., Vorozhcov S. B.* Modelirovanie spiral'nogo inflektora i centrirovaniya orbit v kompaktnom ciklotrone // Matematicheskoe modelirovanie. — 2007.]
4. *Spiral Inflectors and Electrodes in the Central Region of the VINCY Cyclotron* // P. Beluev, V. Jocić, N. Nešković et al. // CYCLOTRONS 2007. The 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Giardini Naxos. — Italy.
5. *Ворожцов А. С.* Формирование электромагнитных полей особо сложной конфигурации в циклотронах и детекторах частиц. Автореферат дисс. ...к.ф.-м.н. — ОИЯИ, 2007. [*Vorozhcov A. S.* Formirovanie ehlektromagnitnihkh poley osobo slozhnoy konfiguracii v ciklotronakh i detektorakh chastic. Avtoreferat diss. ...k.f.-m.n. — OIYaI, 2007.]
6. *Perepelkin E. E., Vorozhcov S. B.* CBDA — Cyclotron Beam Dynamics Analysis Code // Proceedings of RuPAC. — Zvenigorod, Russia: 2008.

UDC 51-37, 537.8

3D Mathematical Model for the Optimization of the Cyclotron Central Electrode Structure

E. E. Perepelkin

*Joint Institute for Nuclear Research, Veksler and Baldin
Laboratory of High Energy Physics
JINR, Joliot -Curie 6, 141980, Dubna, Moscow region Russia*

In this paper the new optimization algorithm for the central region electrode structure definition for the cyclotron is considered. The 3D electrical field maps for various accelerating gaps are used for the central region electrode structure optimization. The accelerating gap positions and other parameters are defined by assuming maximal ion energy gain per turn. The best configuration for 4 basic acceleration regimes was constructed for VINCY cyclotron. The beam dynamics analysis for the new configuration was performed. It was shown that the new configuration has much less beam losses and better ion centering.

Key words and phrases: cyclotron central region optimization, backward tracking, beam dynamics.