

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ КОМПАКТНОГО ЦИКЛОТРОНА

*В. Л. Смирнов*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описаны методы проектирования и оптимизации центральной области компактного циклотрона. Приведены алгоритмы выбора геометрической структуры центра, обеспечивающей не только эффективную проводку частиц, но и формирование пучка высокого качества для дальнейшего ускорения. Рассмотрены соответствующие методы компьютерного моделирования центра ускорителя. В статью включено описание всех основных элементов управления и формирования пучка, присутствующих на современных циклотронах, и методов оптимизации их параметров. Рассмотрены как ускорители с внутренним источником ионов, так и циклотроны, имеющие внешнюю инжекцию с использованием спирального электростатического инфлектора.

Methods of design and optimization of a compact cyclotron central region are described. Algorithms of development of a center geometric structure, which provides both effective beam transmission and high quality of the beam, captured into further acceleration, are given. Methods of computer modeling of a cyclotron central region are described. Description of most basic elements for the beam control and shaping in modern cyclotrons along with optimization of their parameters are given. Both internal ion source machines and external injection cyclotrons with spiral electrostatic inflectors are considered.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Центральная зона циклотрона является ключевой с точки зрения формирования пучка частиц, захваченных в режим ускорения. Ее структура определяет поперечные эмиттансы и продольное распределение частиц в пучке. В зависимости от назначения ускорительной установки имеются различные требования к качеству пучка. Для удовлетворения этих требований в центре циклотрона устанавливаются различные элементы формирования пучка, например фазовые щели, коллиматоры, дефлекторы и элементы фокусировки. Оптимизация структуры центральной области позволяет получать ускоренные пучки частиц повышенного качества, что в некоторых случаях является определяющим фактором. Примером служат установки для медицинских применений. Структурой центра во многом определяется величина амплитуд радиальных бетатронных колебаний частиц. Обеспечение хорошего центрирования пучка за счет грамотного дизайна центральной зоны — одна

¹E-mail: vsmirnov@jinr.ru, Tel.: +74962162160

из важнейших задач при ее проектировании. Интенсивность конечного пучка напрямую зависит от эффективности его проводки через центр циклотрона.

Проектирование центра является неотъемлемой частью процесса моделирования циклотрона. На сегодня спроектировано и введено в эксплуатацию множество компактных циклотронов для различных применений. Накопленный при этом богатый опыт позволяет выделить общие приемы разработки и оптимизации формы, положения и параметров первых ускоряющих зазоров, внутреннего источника ионов и спирального инфлектора и элементов формирования пучка на начальных оборотах. Большая часть этих методов описывается в данной работе.

1. НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Проведение максимально точных расчетов динамики пучка в центральной области циклотрона требует корректного задания начальных данных для расчета. Нахождение траектории заряженной частицы основано на интегрировании уравнений движения частицы во внешнем электромагнитном поле. Для осуществления трассировки ионов необходимо знание распределения электрических и магнитных полей установки и задание начальных параметров пучка. Существует целый ряд коммерческих программ для проведения расчетов электромагнитных полей структурных элементов (Tosca/Opera [1], ANSYS [2], CST [3]), а также программ для анализа динамики частиц в циклотронах [4].

На начальном этапе расчетов можно использовать однородное распределение магнитного поля. Такой подход оправдан лишь для области нескольких первых оборотов частиц в циклотроне, где, по определению, отсутствует заметная пространственная вариация магнитного поля. На следующем шаге расчетов для более корректного анализа динамики частиц, особенно для исследования аксиального движения, необходимо задавать пространственное распределение магнитного поля. Для его расчета достаточно корректно задать граничные условия в расчетной модели и создать качественную расчетную сетку в методе конечных элементов. В этом случае возможная незначительная неточность задания магнитной структуры приведет лишь к малому отклонению уровня и формы поля, что не критично при проектировании центра и не влияет на общую картину движения частиц.

С другой стороны, подготовка реалистичной модели расчета электрического поля ускоряющей системы чрезвычайно важна, поскольку именно электрическое поле в центре в основном определяет характеристики пучка частиц. В случае использования внутреннего источника ионов необходимо помнить о существовании границы плазмы внутри источника, которая особым образом сформирована в щели источника. На это нужно обратить пристальное внимание при создании расчетной модели электрического поля, включающей источник. Пучок изначально формируется при прохождении первого ускоряющего зазора, когда энергия частиц мала и любое изменение линий электрического поля приводит к заметному изменению траекторий ионов. Граница плазмы в щели источника может быть трех основных видов: вогнутая, прямолинейная и выпуклая (рис. 1). Невозможно с уверенностью говорить о превосходстве одной из них над другими. Но, очевидно, что в каждом из этих случаев распределение электрического поля в зазоре будет различным и частицы пучка будут по-разному фокусироваться силовыми линиями ускоряющего поля.

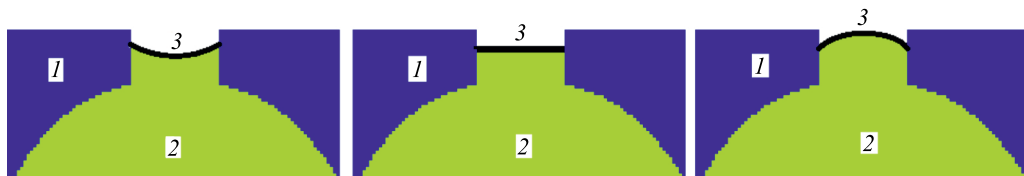


Рис. 1. Возможные формы границы плазмы в щели источника: 1 — источник; 2 — плазма внутри источника; 3 — граница плазмы

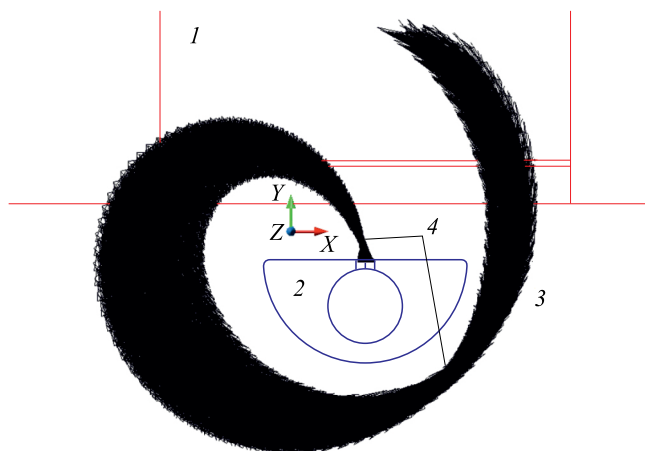


Рис. 2. Траектории частиц пучка на первом обороте: 1 — пуллер; 2 — внутренний ионный источник; 3 — траектории частиц; 4 — положение фокусов пучка

Расчетные и экспериментальные данные [5] показывают, что наиболее вероятно такое распределение электрического поля вблизи щели источника, при котором частицы пучка фокусируются непосредственно после выхода из щели (рис. 2). При этом место расположения второго фокуса находится примерно на расстоянии в пол-оборота от первого.

При расчете поля данного эффекта можно добиться путем введения в расчетную модель «мнимого» электрода, расположенного во внутренней области источника. Его диаметр может быть меньше внутреннего диаметра источника. При этом потенциал поверхности электрода может варьироваться для достижения нужного эффекта, который оценивается либо по анализу формы эквипотенциальных линий, либо по результатам трассировки частиц. Иногда задача решается путем заполнения внутренней области источника неким материалом, на внешней поверхности которого задан потенциал источника (рис. 3). Начальное положение пучка частиц (место начала их движения) при этом задается на некотором расстоянии от поверхности мнимого электрода.

Наиболее часто используемой формой щели источника является случай, когда ее аксиальный размер в несколько раз превышает радиальный. С точки зрения формы электрического поля важны не только размеры щели источника, но и форма фасок. Их оптимизация ведется по величине наклона фаски, которая обычно составляет $40\text{--}60^\circ$. При анализе расчетной модели следует обратить внимание на распределение силовых

линий вблизи краев щели. В большинстве программных комплексов для расчета поля на границе элемента с острым углом, например на краю щели, вычисленное поле будет иметь всплески, обусловленные вычислительными погрешностями. Поэтому необходимо либо сглаживать края электродов, либо генерировать начальное распределение частиц на некотором расстоянии от такой области. Радиальный и аксиальный размеры щели источника и величина угла наклона ее фасок непосредственно влияют на величину тока пучка, вытягиваемого из источника, что подтверждается многочисленными расчетами [6] и результатами измерений (рис. 4).

При использовании внешнего источника ионов с аксиальной линией инжекции и спиральным электростатическим инфлектором необходимо предусмотреть построение достаточно подробной конечно-элементной сетки в расчетной модели для области краевых полей инфлектора. Ионы, проходящие через инфлектор, обладают достаточной энергией, и проблема с малыми неопределенностями в распределении электрического поля остро не стоит.

Для проведения расчетов динамики пучка необходимо иметь информацию о параметрах пучка либо на щели внутреннего источника, либо на входе в спиральный инфлектор. При создании начального распределения частиц в пучке, инжектируемом из внутреннего источника, следует учитывать зависимость вытягиваемой интенсивности пучка от амплитуды вытя-

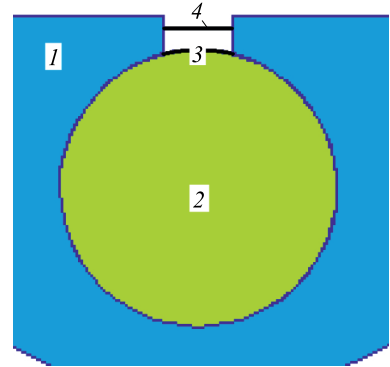


Рис. 3. Задание начальных условий для расчета ускоряющего электрического поля в области внутреннего источника: 1 — источник; 2 — внутренняя область источника, заполненная плазмой; 3 — граница мнимого электрода, на которой задан потенциал источника; 4 — место, с которого начинают движение частицы в расчете

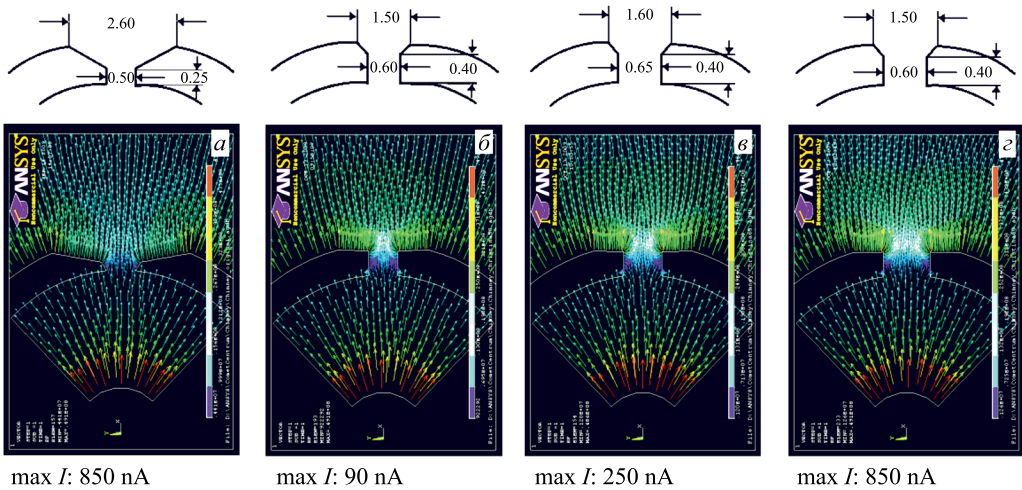


Рис. 4. Результаты расчетов по анализу формы щели внутреннего источника ионов [6], из которых следует, что для вариантов а и г обеспечивается наилучшая интенсивность вытягиваемого пучка

гивающего напряжения, которая подчиняется закону Чайлда–Ленгмюра [7]:

$$I(\theta) = \text{const} \sqrt{\frac{q}{m}} \frac{\cos^{3/2}(\theta)}{d^2}, \quad (1)$$

где q — заряд иона; m — масса; d — эффективное расстояние между щелью источника и вытягивающим электродом, при оценке которого учитывается отличное от нуля электрическое поле внутри аксиального зазора электродов; θ — фаза ВЧ.

Модельное начальное распределение пучка на щели внутреннего источника может выглядеть, например, следующим образом:

— области внутри заданных эллипсов на фазовых плоскостях (R, Pr) , (Z, Pz) и в конфигурационном пространстве (R, Z) заполнены в соответствии с выбранным способом;

— в продольном направлении задана зависимость количества модельных частиц от фазы вытягивающего ВЧ-напряжения согласно (1);

— частицы пучка начинают движение в моменты времени, определяемые своей начальной фазой ВЧ.

Для внешнего источника ионов обычно имеются измеренные поперечные эмиттансы и энергия частиц инжектируемого пучка. Таким образом, достаточно лишь выбрать способ заполнения 6-мерного объема пучка, проекции которого на соответствующие координатные плоскости известны. Помимо равномерного заполнения по фазовому объему пучка распространены также два других популярных распределения: гауссово и Капчинского–Владимирского (КВ). В первом случае заполнение объема пучка ведется отдельно в каждой из двумерных плоскостей — проекциях 6-мерного пространства с плотностью

$$I(x, x') = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{x'}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{x'^2}{\sigma_{x'}^2}\right)\right], \quad (2)$$

где σ_x и $\sigma_{x'}$ — стандартные отклонения распределения в направлениях x и x' .

Распределение КВ имеет постоянную зависимость плотности частиц внутри фазового эллипса и задается следующим образом:

$$I(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{\pi\varepsilon}, & \text{если } \gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 \leq \varepsilon, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где α , β , γ , ε — твист-параметры эллипса.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАКОНЕЧНИКОВ УСКОРЯЮЩИХ ДУАНТОВ

Первоочередной задачей при проектировании циклотронного центра является обеспечение эффективного набора энергии ионами на первых оборотах. Опубликован ряд работ, посвященных решению данной задачи [8–10]. Можно выделить общий способ выбора геометрической структуры центральной зоны, который может быть полезен на начальном этапе моделирования. Алгоритм сводится к выбору положения ускоряющих

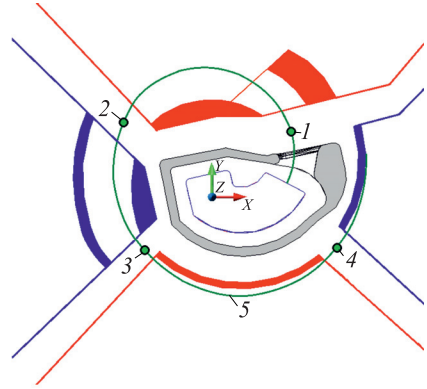


Рис. 5. Конфигурация центральной зоны, в которой ион вследствие недобора энергии соударяется со стенкой структуры: 1–4 — пересечение ионом первого/второго/третьего/четвертого ускоряющих зазоров; 5 — траектория иона

зазоров дуантов вдоль траектории частицы на основании анализа ее фазового движения. Для примера рассмотрим циклотрон, который должен быть спроектирован для работы в таком режиме, когда набег ВЧ-фазы между двумя последовательными прохождениями ускоряющих зазоров равен 180° . Допустим, что начальная структура выбрана так, что ион соударяется с вертикальным постом на первом обороте по причине недостаточного набора энергии (рис. 5). Задача сводится к изменению структуры ускоряющей системы таким образом, чтобы частица пересекала ускоряющие зазоры в моменты времени, соответствующие максимальному напряжению на дуантах. Для этого необходимо провести анализ фазового движения иона. В данном случае частица достигает второго зазора, имея ВЧ-фазу, соответствующую спаду ускоряющего напряжения (рис. 6).

Аналогично вычисляются места положения иона, соответствующие желаемой ВЧ-фазе, для каждого из ускоряющих зазоров (рис. 7, а). Геометрическая структура модифицируется таким образом, что центры ускоряющих зазоров совмещаются с вычисленными ранее оптимальными положениями частицы (рис. 7, б). Следует учесть то, что при изменении структуры одного зазора траектория иона изменяется и ранее вычисленное положение следующего зазора становится неоптимальным. Поэтому требуется проведение итерационного процесса, включающего пересчет распределения электрического поля и динамики частиц. Желательно располагать ускоряющие зазоры так, чтобы они были

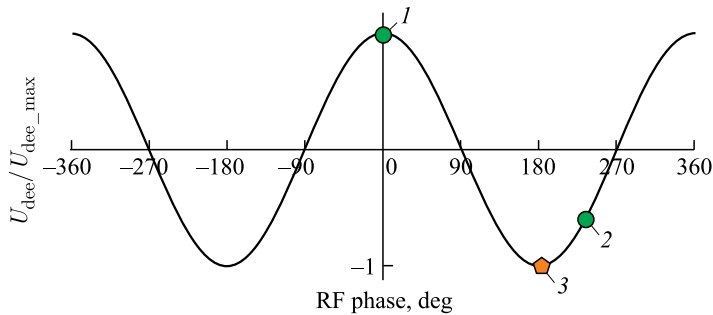


Рис. 6. Зависимость ускоряющего напряжения от ВЧ-фазы: 1 — момент пересечения частицей первого ускоряющего зазора; 2 — частица пересекает второй зазор; 3 — желаемое место пересечения частицей второго ускоряющего зазора

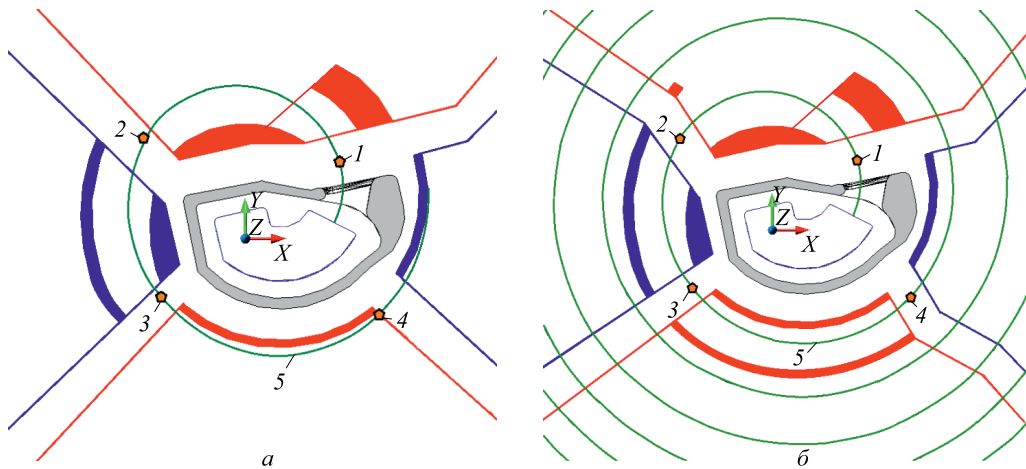


Рис. 7. Указание оптимальных положений частицы на фоне начальной геометрической структуры (а) и модифицированная конфигурация ускоряющей системы (б): 1–4 — оптимальные положения иона при пересечении первого/второго/третьего/четвертого ускоряющих зазоров; 5 — траектория иона

перпендикулярны траектории частицы. Эффективным является также введение в модель дополнительных вертикальных постов, расположенных на границах зазоров и формирующих электрическое поле в них.

3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕНТРИРОВАНИЯ ПУЧКА

Центрирование пучка является важнейшей характеристикой процесса ускорения в циклотроне. Величина амплитуд радиальных бетатронных колебаний частиц на конечном радиусе непосредственно влияет на эффективность вывода пучка из вакуумной камеры ускорителя. Коррекция колебаний может быть произведена с помощью модификации магнитного поля, например, введения первой гармоники на начальных радиусах. Но определяющий вклад в величину центрирования вносит конфигурация центральной области циклотрона. Изменение положения и формы ускоряющих зазоров ведет к изменению траектории частицы, а следовательно, и величины ее центрирования. При этом в большинстве случаев достаточно проводить оптимизацию структуры центра, анализируя лишь поведение центральной частицы пучка. Минимизация амплитуд свободных колебаний центрального иона ведет как к уменьшению радиальных бетатронных колебаний всех частиц пучка, так и к некоторому уменьшению некогерентных колебаний ионов в пучке.

Решение задачи центрирования пучка актуально как для циклотронов с внутренним источником, так и для ускорителей, использующих аксиальную линию инжекции и спиральный инфлектор. Можно выделить два наиболее популярных метода оценки центрирования пучка. Это может быть анализ, основанный на вычислении центров мгновенных окружностей, касательной к которым является траектория частицы [11]. Центры таких окружностей в зависимости от формы магнитного поля отстоят на некотором расстоя-

нии от геометрического центра ускорителя. Причем отклонения центров окружностей содержат вклад в движение орбиты, обусловленный наличием пространственной вариации магнитного поля. Визуально, либо вычислив среднее значение координат центров окружностей, можно оценить величину радиальных амплитуд. Данный метод направлен на вычисление именно отклонений центров мгновенных орбит от геометрического центра циклотрона, а не амплитуды колебаний частиц относительно замкнутой равновесной орбиты. Для большинства случаев эти величины эквивалентны. Но возможны структуры, где это не так, например, магнитное поле, в котором присутствует такая первая гармоника, что для иона можно найти равновесную замкнутую орбиту. В таком поле центры мгновенных окружностей, касательной к которым является траектория частицы, вращающейся точно по равновесной орбите, будут смещены относительно геометрического центра циклотрона. Хотя очевидно, что частица не совершает радиальных колебаний относительно равновесной орбиты. Поэтому необходимо использование дополнительного алгоритма учета смещения замкнутой равновесной орбиты.

Широко распространен способ вычисления амплитуд радиальных бетатронных колебаний частиц, основанный на анализе поведения частицы в пространстве $(r; pr)$ при пересечении ею фиксированного азимута. Ион, стартующий с некоторым отклонением по радиусу или углу от значений, соответствующих начальным значениям замкнутой равновесной орбиты, после совершения достаточного количества оборотов описывает эллипс в пространстве $(r; pr)$ (Eigen ellipse [12]). После приведения полученного эллипса к каноническому виду его r -полуось определяет величину амплитуды радиальных колебаний частицы. В случае наклонного эллипса, если известны его твисс-параметры (β, γ) и эмиттанс (ε) , искомая полуось может быть вычислена как [13]

$$A = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \left(\sqrt{\frac{\beta + \gamma}{2} + 1} - \sqrt{\frac{\beta + \gamma}{2} - 1} \right).$$

Алгоритм вычисления амплитуд колебаний на всей длине траектории ускоряемой частицы может быть следующим. В процессе расчета ускорения иона при пересечении им выбранного азимута в массив памяти заносятся координаты точки пересечения и направление вектора скорости частицы. Затем каждый такой набор данных становится стартовым для нового расчета траектории частицы. При этом ускоряющее напряжение уже не учитывается, и частица, стартуя с ускоренной орбиты, совершает обороты в магнитном поле, не изменяя при этом свою энергию. Совершив оборот, частица пересечет стартовый азимут с координатами или углами, отличными от стартовых значений. При совершении определенного количества оборотов частица описывает искомый самосогласованный эллипс. При этом нет необходимости в вычислении равновесной ускоренной орбиты, так как описанный алгоритм вычисления радиальных амплитуд не использует ее координаты в явном виде.

При проектировании центра целесообразно чередовать изменение геометрической структуры с расчетом амплитуд радиальных бетатронных колебаний частиц. Конфигурация системы на первом обороте является определяющей. Вариация азимутального положения ускоряющих зазоров приводит к изменению фазы ускоряющего напряжения, при которой частица их пересекает. Следовательно, изменяется набор энергии при прохождении ускоряющего промежутка и траектория частицы. При этом значение имеет также угол между нормалью к ускоряющему зазору и касательной к траектории, а также длина

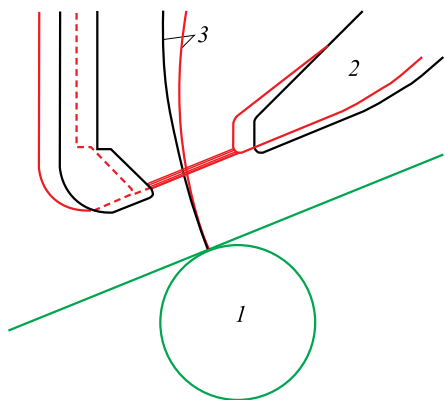


Рис. 8. Изменение траектории частицы с помощью положения пуллера и длины ускоряющего промежутка: 1 — источник ионов; 2 — пуллер; 3 — траектория частицы

трагальную линию ускоряющего дуанта. Направление магнитного поля и напряжение на ускоряющих электродах такие, что частица с уменьшением энергии приходит в центральную зону ускорителя. Таким образом моделируется процесс замедления частицы, имеющей хорошо центрированную ускоренную орбиту. Исследователь получает искомую траекторию вплоть до первых оборотов в центральной зоне циклотрона, которая и служит визуальным ориентиром при оптимизации структуры. Существуют работы, посвященные автоматическому подбору параметров центральной зоны с целью получения хорошего центрирования пучка [16]. Входными параметрами в данных алгоритмах являются характеристики ускоряемого иона и заданное распределение магнитного поля.

Величина амплитуд свободных радиальных колебаний частиц находится в определенной зависимости от соотношения энергии и радиуса инжекции ионов. Радиус орбиты частицы на первом обороте должен находиться как можно ближе к ее энергетическому радиусу, который можно вычислить по формуле

$$R = \frac{Mv}{QB}, \quad (4)$$

где M , Q , v — масса, заряд и скорость иона; B — величина магнитного поля.

В циклотронах с внутренним источником ионов для улучшения центрирования также можно варьировать либо радиальное положение источника, либо величину амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах.

4. МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ЧАСТИЦ

Обеспечение максимально возможного коэффициента проводки пучка (трансмиссии) через центральную зону является одной из основных задач при проектировании циклотрона. Следует учитывать различные факторы, влияющие на движение частиц. Радиаль-

ускоряющего промежутка, так как времяпролетный фактор частицы мал. Особенно важна область первого ускоряющего зазора. Так, траекторию частицы здесь можно эффективно корректировать с помощью формы пуллера (рис. 8).

Для уменьшения временных затрат на начальном этапе в качестве критерия при улучшении центрирования можно использовать визуальную близость траектории иона к идеально центрированной орбите. Последнюю можно получить, используя так называемый backward tracking [14]. Суть метода состоит в следующем. Вычисляется замкнутая равновесная орбита вблизи конечного радиуса [15], где она наиболее близка к равновесной ускоренной орбите. От координат найденной орбиты начинается движение частица. Для определенности нужно в качестве стартового положения использовать азимут, на котором известна фаза ВЧ частицы, например, центральную

ные потери пучка в основном определяются недостаточным набором энергии при прохождении ускоряющих зазоров. Аксиальное поведение частиц зависит от фокусировки как электрическим, так и магнитным полями. Конструкция центральной зоны, как правило, требует наличия различных постов, соединяющих верхнюю и нижнюю части системы и пересекающих медианную плоскость ускорителя. Решение задачи оптимизации положения и формы этих постов направлено на уменьшение количества потерь полезной части пучка (ионов, предназначенных для дальнейшего ускорения) и определенной локализации мест, где ионы, получившие недостаточный энергетический набор, соударяются с элементами системы. При этом следует понимать, что модификация геометрической структуры в области первых ускоряющих зазоров ведет к изменению распределения электрического поля, что требует его пересчета после внесения изменений в структуру. Эффект особенно заметен при оптимизации формы пуллера, которая задает начальные параметры траекторий частиц на первых оборотах [12]. На стенках пуллера обычно «гибнет» большая часть частиц. Изменение радиального и аксиального зазоров пуллера ведет к изменению как энергетического набора, так и направления движения частиц. Аксиальная апертура пуллера влияет также на аксиальную фокусировку ионов. При этом эффективным может быть как уменьшение, так и увеличение величины зазора, который должен подбираться индивидуально для каждой конкретной центральной зоны.

На аксиальное движение частиц в области первых оборотов большое влияние оказывает ускоряющее электрическое поле. Оно может как фокусировать частицы, пересекающие ускоряющий зазор при спадающем напряжении на ускоряющих дуантах, так и расфокусировать ионы в случае растущего напряжения. Поэтому необходимо так проектировать центральную зону, чтобы пучок максимальное количество раз пересекал ускоряющие зазоры при спадающей величине ускоряющего напряжения [17].

В случае использования внешней инжекции ионов и спирального инфлектора величина амплитуд аксиальных колебаний частиц зависит от уровня оптимизации структуры инфлектора, который должен обеспечивать оптимальный вход центральной частицы в медианную плоскость. Траектория иона должна пересекать медианную плоскость под минимальным углом. При соблюдении данного критерия имеет место совпадение траектории центральной частицы с теоретической центральной линией инфлектора. Наличие краевого электрического поля на входе и выходе инфлектора увеличивает его эффективную длину. При этом траектория иона отклоняется от центральной линии инфлектора, что приводит к росту амплитуды аксиальных колебаний частиц в процессе ускорения. Проблема решается методом укорачивания электродов инфлектора. Обычно величина обреза составляет несколько миллиметров на входе и несколько градусов в системе координат инфлектора на выходе (рис. 9). Выбор величины обреза электродов производится на основе трассировки ионов через трехмерное поле инфлектора и представляет собой итерационный процесс расчета поля и динамики частиц. Важно, что данная процедура должна производиться в присутствии электрического поля ускоряющих дуантов, так как их поле кардинальным образом влияет на движение частицы на выходе из инфлектора. Также на искомую величину оказывает влияние геометрическая структура частей, окружающих инфлектор и изменяющих распределение электрического поля в области движения частиц. Поэтому оптимизация инфлектора должна производиться с присутствием всех основных окружающих его частей. Окончательная корректировка аксиальных колебаний частиц может быть произведена с помощью малого аксиального перемещения инфлектора.

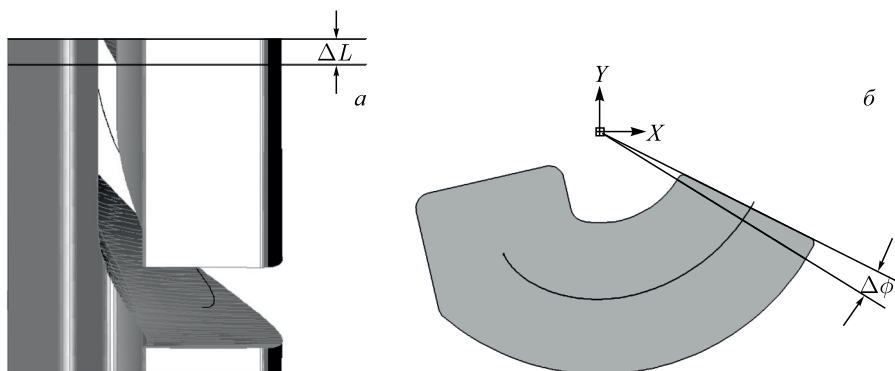


Рис. 9. Направления обреза электродов спирального электростатического инфлектора на входе (а) и выходе (б) для согласования его эффективной длины с величиной, рассчитанной аналитическим методом

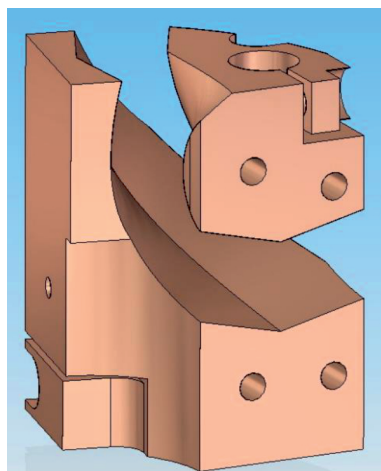


Рис. 10. Спиральный инфлектор с изогнутой формой электродов для обеспечения дополнительной аксиальной фокусировки пучка [18]

Пучок, выходящий из инфлектора, является расходящимся в аксиальном направлении, что иногда становится причиной большого процента аксиальных потерь частиц. Проблема может быть частично решена с помощью установки дополнительных элементов фокусировки пучка в области между инфлектором и пуллером, например, магнитной квадрупольной линзы [18]. В этом случае необходимо при проектировании центральной зоны предусмотреть наличие свободного места в области первого ускоряющего зазора для установки элемента. Известно также, что спиральный инфлектор, имеющий изогнутую форму электродов (рис. 10), приводит к заметному уменьшению аксиального размера пучка. Экспериментально доказано, что использование такого инфлектора может привести к увеличению трансмиссии через центральную зону циклотрона [19]. Радиальный эмиттанс пучка при этом растет, но для целого ряда ускорителей это не принципиально.

Эффект, обусловленный использованием такого инфлектора, определяется тем, что на частицы пучка, проходящие в зазоре инфлектора, действует электрическое поле, эквипотенциальные линии которого направлены таким образом, что имеет место дополнительная аксиальная фокусировка пучка на выходе. Похожего эффекта (но в меньшей степени) можно добиться, если сдвинуть один из электродов классического спирального инфлектора в аксиальном направлении так, чтобы зазор инфлектора на выходе несколько увеличился. Также к значительному уменьшению аксиальной дефокусировки пучка на выходе из инфлектора приводит такая его модификация, при которой внутренний электрод инфлектора имеет меньшую ширину, чем внешний (рис. 11). Под внутренним электродом

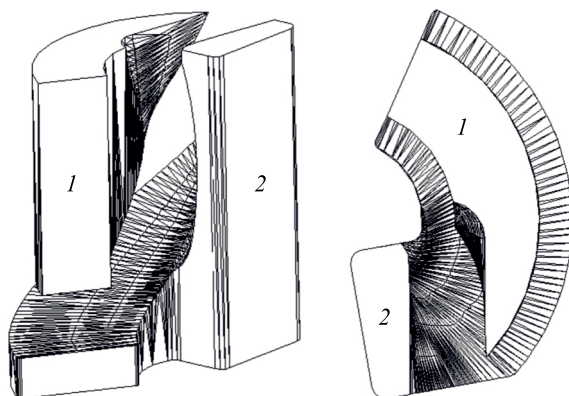


Рис. 11. Спиральный инфлектор с различной шириной электродов: 1 — внутренний электрод; 2 — внешний электрод

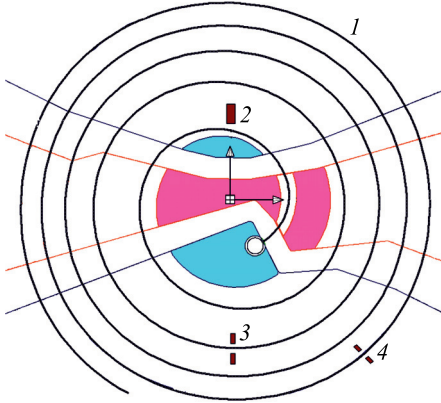
понимается тот электрод, в сторону которого осуществляется отклонение пучка частиц электрическим полем. Подбором соотношения величин ширины внутреннего и внешнего электродов инфлектора можно добиться необходимого воздействия на характеристики пучка. Величина искомого соотношения подбирается по результатам расчетов динамики пучка и близка к 1,7–2.

Величина радиальных потерь частиц в циклотронах, в которых используется спиральный инфлектор, во многом зависит от энергии инжекции пучка. Повышение начальной энергии иона ведет к увеличению радиуса его орбиты. Однако при этом растут радиальные размеры спирального инфлектора и, как следствие, размеры инфраструктуры, которую иону требуется обогнуть на первом обороте. При уменьшении энергии инжекции ситуация противоположная. Расчетным путем можно убедиться в том, что оптимальным случаем с точки зрения минимизации радиальных потерь пучка является такой режим работы, при котором величина энергии инжекции меньше величины амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах. В таком случае размеры структуры центра минимальны, а частица, проходя первые ускоряющие промежутки, значительно увеличивает радиус своей орбиты. Поэтому в условиях ограниченного ускоряющего напряжения целесообразно уменьшать энергию инжекции.

5. СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА

Назначение большей части циклотронов диктует особые требования к качеству пучка после прохождения центральной области. Система селекции пучка на первых оборотах обычно состоит из набора фазовых щелей, устройств модуляции интенсивности и различных коллиматоров. Количество фазовых щелей, образуемых несколькими аксиальными постами, может варьироваться от одной до трех-четырех. Они предназначены для выделения определенного радиального размера пучка, который непосредственно связан с его фазовым размером. Система фазовых щелей должна обеспечивать возможность выборки фазового диапазона от нескольких градусов ВЧ до максимально возможного размера, задаваемого аксептансом центральной области ускорителя. Выбор формы и мест распо-

ложения элементов определяет их функциональность и удобство использования. Можно выделить несколько простых рекомендаций, которые могут быть полезны при проектировании фазовых щелей:



- щель наиболее функциональна, если установлена в месте наибольшего радиального размера пучка;

- чем ближе к центру установлено устройство, тем оно эффективнее и тем меньше радиационные потери на нем;

- если щелей несколько, то целесообразно располагать их на разных оборотах и азимутально с разницей в половину периода системы, например, в холме и долине;

- элементы должны быть установлены вдали от ускоряющих зазоров, например, вдоль центральных линий пространства между дуантами (рис. 12).

Рис. 12. Возможное расположение фазовых щелей в центральной области циклотрона: 1 — траектория центрального иона, 2– 4 — первая/вторая/третья фазовые щели

частиц, захваченных в режим ускорения). Допустим, что исследуется циклотрон с внутренним источником. В этом случае фазовый акцептанс центра, как правило, состоит из частиц, начальные ВЧ-фазы которых не выходят за рамки диапазона $(-90; 0)^\circ$, если мы говорим о случае, когда максимальное вытягивающее напряжение приходится на фазу 0° (рис. 13). Тогда, установив щели и меняя их размер (радиальное расстояние между верти-

Эффект от использования фазовой щели можно оценить, анализируя фазовый акцептанс центральной зоны (диапазон начальных ВЧ-фаз

частиц, захваченных в режим ускорения). Допустим, что исследуется циклотрон с внутренним источником. В этом случае фазовый акцептанс центра, как правило, состоит из частиц, начальные ВЧ-фазы которых не выходят за рамки диапазона $(-90; 0)^\circ$, если мы говорим о случае, когда максимальное вытягивающее напряжение приходится на фазу 0° (рис. 13). Тогда, установив щели и меняя их размер (радиальное расстояние между верти-

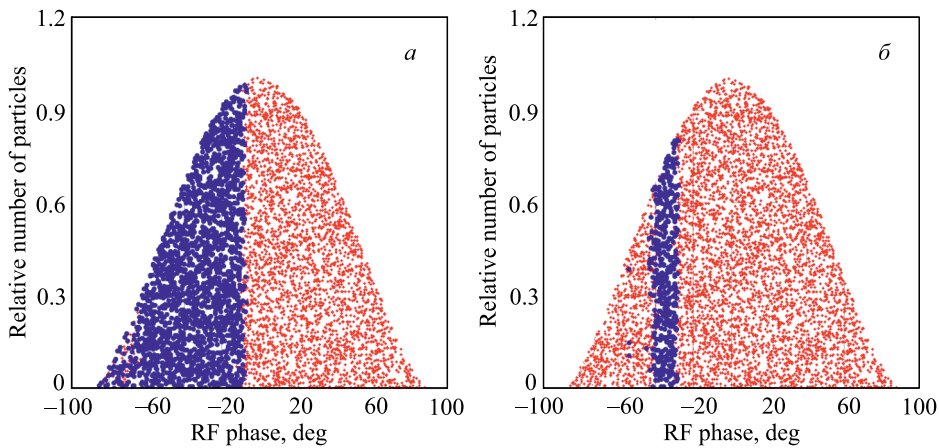


Рис. 13 (цветной в электронной версии). Фазовый акцептанс центральной зоны без использования фазовых щелей (а) и в случае, когда набором фазовых щелей выделяется 10-градусный банч (б). Малыми красными точками (светло-серыми) показаны ионы, вытягиваемые из источника. Крупные синие кружки (темные) — частицы, которые пройдут центральную зону и будут захвачены в режим ускорения

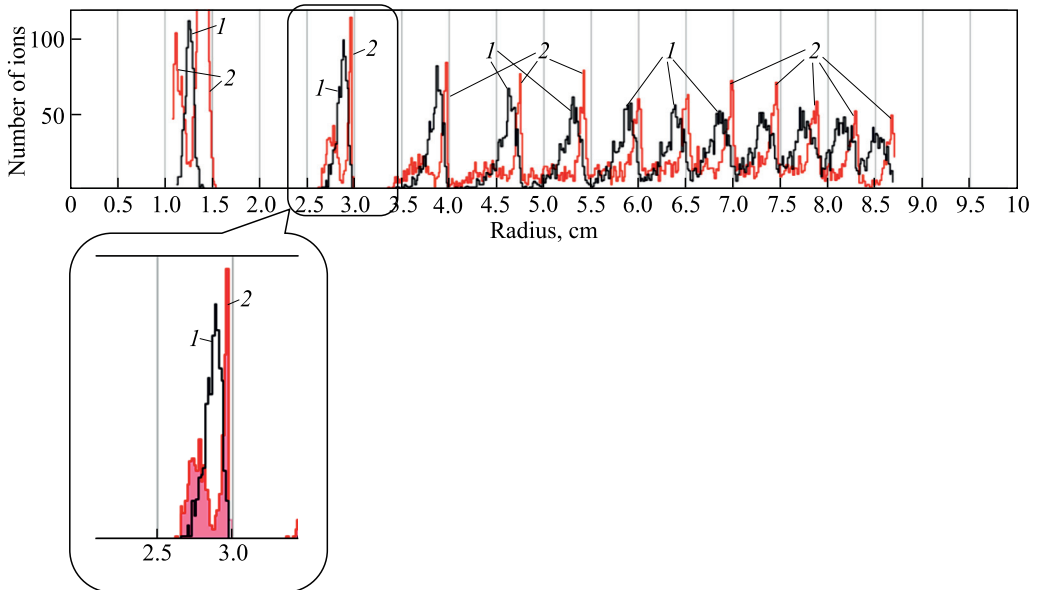


Рис. 14 (цветной в электронной версии). Распределения частиц в азимутальной плоскости расположения фазовой щели. Выделен оптимальный диапазон радиусов для установки щели. Часть ионов, которые необходимо выделить, показана черным (1), а распределение частиц, которые необходимо отсеять, — красным цветом (2)

кальными постами), можно изменять фазовый аксептанс центра и выделять необходимый фазовый размер пучка.

Более тщательная оптимизация положения и размеров щелей может быть проведена согласно следующему алгоритму. Генерируются два начальных распределения частиц. Первый пучок содержит ионы, имеющие стартовые фазы ВЧ из фазового диапазона, который требуется выделить фазовыми щелями. Второй пучок содержит частицы, имеющие все фазы ВЧ за исключением тех, которые содержатся в первом пучке. С помощью программы анализа динамики частиц производится трассировка последовательно обоих пучков через центральную зону, которая еще не содержит фазовых щелей. Анализируется распределение частиц при пересечении возможного азимута расположения первой щели. Критерием оптимальности радиуса расположения щели на выбранном азимуте является случай, когда имеет место минимальное перекрытие между частицами, которые необходимо выделить, и оставшейся частью пучка (рис. 14).

Аналогичная процедура повторяется для всех оставшихся щелей при условии, что пучки пропускаются через структуру, уже содержащую предыдущие фазовые щели, и частицы, соударяющиеся с их стенками, выпадают из дальнейшего движения.

6. КРИТЕРИЙ КИЛПАТРИКА

Поскольку траектория частицы на первых оборотах определяется геометрической структурой центральной области, то важно на начальном этапе проектирования оценить минимально возможные размеры ускоряющих зазоров. Последующая техническая прора-

ботка концептуального дизайна и измерения на прототипах выявят проблемные места с точки зрения пробоев, если величины зазоров выбраны неверно. В этом случае последует модификация проекта центральной зоны. Многие годы исследователи руководствовались полуэмпирической формулой, именуемой критерием Килпатрика [20, 21]:

$$f[\text{МГц}] = 1,64E [(\text{МВ/м})^2] \exp(-8,5/E[\text{МВ/м}]). \quad (5)$$

Формула (5) дает зависимость частоты, с которой работает ускоряющая система, от напряженности электрического поля в зазоре. Однако с развитием техники обработки поверхностей, характеристик рабочего вакуума и других аспектов, влияющих на величину пробоя, практически во всех современных ускорительных установках осуществляются режимы работы с превышением величины напряженности электрического поля, получаемой из формулы (5). Электрическая прочность вакуумного зазора постоянно изучается, в основном экспериментальным путем. Значения, полученные на различных установках, имеют достаточно большой разброс [21] и зависят от конкретных условий проведения эксперимента. Существуют примеры достижения напряженностей электрического поля, в десятки раз превышающих критерий Килпатрика. Тем не менее требование надежности работы циклотрона приводит к тому, что прослеживается общая граница максимальной напряженности в ускоряющих зазорах в центральной области ускорителя, в 1,3–1,4 раза превышающая критерий Килпатрика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большой накопленный опыт проектирования и оптимизации центральных областей компактных циклотронов позволяет выделить некоторые методы и алгоритмы, которые являются базовыми при разработке центра. Приведенный материал направлен на описание приемов разработки структуры, удовлетворяющей основным критериям: увеличению коэффициента проводки пучка, обеспечению хорошего центрирования пучка и получению требуемого качества ускоряемого пучка. Работа может быть полезна на начальном этапе проектирования и оптимизации центральной области компактного циклотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.operafea.com
2. www.ansys.com
3. www.cst.com
4. *Smirnov V.* Computer Codes for Beam Dynamics Analysis of Cyclotron-Like Accelerators // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2017. V. 20. P. 124801.
5. *Forringer E. R.* Phase Space Characterization of an Internal Ion Source for Cyclotrons. Doctor of Philosophy Thesis. Depart. of Phys. and Astron. MSU, USA, 2004.
6. *Wouters C., Baumgarten C., Forss S., Vrankovic V., Zhang H., Schippers M.* Central Region Studies of the 250 MeV SC Cyclotron for Proton Therapy // *Proc. of ECPM 2009.*
7. *Batygin Y.* Low Energy Beam Transport for Intense Beams, High Intensity RF Linear Accelerators // U.S. Part. Accel. School, Albuquerque, New Mexico, June 23–27, 2014.

8. *Blosser H. G.* Optimization of the Cyclotron Central Region for the Nuclear Physics User // Proc. of the Fifth Intern. Cyclotron Conf. Oxford, England, 1969.
9. *Bellomo G.* The Central Region for Compact Cyclotrons // Proc of Cyclotrons'89, Berlin, 1989. P. 325–334.
10. *Belmont J.-L.* Ion Transport from the Source to First Cyclotron Orbit // Nukleonika. 2003. V. 48, Suppl. 2. P. S13–S20.
11. *Milinkovic Lj. S., Subotic K. M., Fabrici E.* Properties of Centered Accelerated Equilibrium Orbits // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 273. P. 87–96.
12. *van Nieuwland J. M., Hazewindus N.* Some Aspects of the Design of a Cyclotron Central Region // Philips Res. Rep. 1974. V. 29. P. 528–559.
13. *Kalvas T.* Beam Extraction and Transport // CAS–CERN Accel. School, Ion Sources, Senec, Slovakia, May 29–June 8, 2012. P. 537–564. CERN-2013-007.
14. *Chautard F.* Beam Dynamics for Cyclotrons // CAS Proc. 2005. V. 12. P. 209.
15. *Gordon M. M., Welton T. A.* Computation Methods for AVF Cyclotron Design Studies. Oak Ridge Nat. Lab. Report ORNL-2765. 1959.
16. *Zhidkov E. P., Perepelkin E. E., Vorozhtsov S. B.* Modeling of the Spiral Inflector and the Orbit Centering in a Compact Cyclotron // Math. Models Comp. Simulations. 2009. V. 1, No. 6. P. 704–711.
17. *Kleeven W., Zarembo S.* Cyclotrons: Magnetic Design and Beam Dynamics. arXiv: 1804.08961. 2018.
18. *Ivanenko I. A.* Methods of Compensation of the Beam Vertical Divergence at the Exit of Spiral Inflector in Cyclotrons // Proc. of Cyclotrons'16, Zurich, Switzerland, 2016.
19. *Gikal B. N., Gulbekian G. G., Ivanenko I. A.* U400 Cyclotron Spiral Inflector with Beam Vertical Focusing Effect // Proc of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010. P. 4536–4538.
20. *Kilpatrick W. D.* Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC // Rev. Sci. Instr. 1957. V. 28. P. 824.
21. *Verdú Andrés S.* Literature Research on Kilpatrick's Criterion // CLIC Exp. & Breakdown Studies Meeting, CERN, Dec. 8, 2009.