

«FLAT-TOP» СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

*Г. Г. Гульбекян, В. А. Бузмаков, В. Б. Зарубин,
И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов, Г. А. Карамышева, Й. Франко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматривается «flat-top» резонатор высокочастотной ускоряющей системы разрабатываемого в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) циклотрона ДЦ-280, предназначенного для получения ускоренных пучков ионов от неона до урана.

В работе определены параметры, предложена конструкция, представлены результаты численного и экспериментального моделирования «flat-top» резонатора высокочастотной ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280. На основе численного моделирования найдена геометрия «flat-top» резонатора, обеспечивающая требуемую зависимость от радиуса напряжения на ускоряющем зазоре.

The flat-top cavity of the radio-frequency accelerating system designed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research (FLNR, JINR), for the DC280 cyclotron is described. The cyclotron is intended for increasing capabilities and efficiency of experiments on synthesis of superheavy elements and investigation of their nuclear-physical and chemical properties. The DC-280 isochronous heavy-ion cyclotron will produce accelerated beam of ions in the range from neon to uranium.

The parameters, design and results of the experimental and 3D computer modeling of the flat-top cavity of the RF accelerating system of the DC-280 cyclotron are reported.

PACS: 29.20.Dg

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований сооружается новый циклотрон ДЦ-280 [1, 2], предназначенный для ускорения ионов со средним значением отношения массы A к зарядности Z (A/Z от 4 до 7). Изохронный циклотрон тяжелых ионов ДЦ-280 должен обеспечить получение ускоренных ионов от неона до урана. Интенсивность пучков ионов планируется довести до $10 \text{ мкА} \cdot \text{частиц}$.

Для достижения требуемой интенсивности необходимо увеличить полную эффективность передачи пучка в циклотроне (от источника ионов до мишени физической установки) до уровня 60–70%. Это достигается, во-первых, за счет подъема энергии инжекции в циклотрон до 50–80 кэВ на единицу заряда частицы, что приводит к значительному уменьшению кулоновского расталкивания частиц, во-вторых, за счет создания плоской в широком диапазоне фаз вершины («flat-top») эффективного ускоряющего напряжения [3, 4].

Принцип действия «flat-top» системы заключается в добавлении к основному высокочастотному (ВЧ) напряжению дополнительного, с нечетной (3, 5, 7-й) частотой, кратной частоте основного напряжения. Технология «flat-top» позволит уменьшить импульсный разброс в ускоренном сгустке ионов и реализовать эффективный однооборотный вывод, что увеличит эффективность передачи пучка. Дополнительное ускоряющее напряжение может создаваться как в зазоре основного ускоряющего дуанта [3], так и с помощью специально созданных дуантов [4].

В данной работе рассмотрена «flat-top» система циклотрона ДЦ-280, реализованная с помощью двух дополнительных дуантов, работающих на третьей гармонике основного ускоряющего ВЧ-напряжения. Определены параметры системы и допуски на них. Оценено влияние небольшого нарушения изохронности движения частиц на работу «flat-top» системы. Предложена конструкция «flat-top» дуанта и проведен его расчет. На основе численного моделирования найдена геометрия «flat-top» резонатора, обеспечивающая требуемую зависимость от радиуса напряжения на ускоряющем зазоре в необходимом диапазоне частот.

1. УСКОРЯЮЩАЯ ВЧ-СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

Ускоряющая ВЧ-система предназначена для передачи энергии ускоряющего электромагнитного поля ускоряемым частицам. Δ -образные дуанты двух основных ВЧ-резонаторов ускоряющей системы расположены в противоположных долинах магнитной структуры. Угловая протяженность дуантов равна 45° . Ускорение осуществляется на третьей гармонике частоты обращения частиц (кратность $h_0 = 3$). Основной резонатор обеспечивает получение ускоряющего напряжения в диапазоне частот 7,32–10,38 МГц при амплитуде напряжения до 130 кВ. Геометрия, параметры и результаты расчетов основного высокочастотного резонатора ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280 подробно описаны в [5].

2. «FLAT-TOP» РЕЗОНАТОРЫ

«Flat-top» ВЧ-система предназначена для создания плоской формы вершины ускоряющего напряжения циклотрона, схематически показанной на рис. 1. Она состоит из двух дополнительных дуантов, работающих на третьей гармонике основного ускоряющего напряжения (кратность $h = 3h_0 = 9$) в диапазоне частот 21,96–31,14 МГц. Угловая

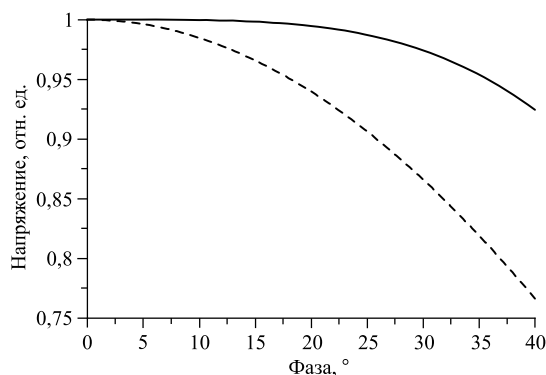


Рис. 1. Суммарное напряжение — сплошная кривая, основное ускоряющее напряжение — штриховая

протяженность дуантов «flat-top» системы составляет 20° . Они расположены в рабочем пространстве секторов магнитной структуры, сразу после основных резонаторов. Максимальное напряжение на «flat-top» дуантах — 13 кВ.

3. НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУАНТАХ

Набор энергии ΔW в дуанте можно определить по формуле

$$\Delta W = 2 \frac{Z}{A} e U \cos 2\pi f t \quad (1)$$

с эффективной амплитудой напряжения U , равной

$$U = U_0 \cos \left(\frac{h(\delta - \delta_0)}{2} \right), \quad (2)$$

где U_0 и f — амплитуда напряжения и частота ВЧ-поля дуанта; δ — его угловая протяженность; h — кратность ускорения. Эффективная амплитуда ускоряющего напряжения максимальна при угловой протяженности дуанта, равной оптимальному значению δ_0 :

$$h\delta_0 = \pi. \quad (3)$$

В соответствии с формулой (2) при максимальном напряжении основного дуанта $U_{10 \max} = 130$ кВ максимальное эффективное напряжение составляет $U_{RF \max} = 0,924 U_{10 \max} = 120$ кВ. Эффективная амплитуда напряжения «flat-top» дуанта U_{FT} совпадает с амплитудой напряжения на его зазоре U_{30} .

Эффективное ускоряющее напряжение $V(\varphi)$ является суперпозицией основного и напряжения «flat-top» системы:

$$V(\varphi) = V_{\max} \left(\frac{1}{1 + U_{FT}/U_{RF}} \cos \varphi + \frac{U_{FT}/U_{RF}}{1 + U_{FT}/U_{RF}} \cos 3\varphi \right), \quad (4)$$

где ϕ — фаза основного ускоряющего напряжения, $V_{\max} = U_{RF} + U_{FT}$.

Отношение амплитуд U_{FT}/U_{RF} можно найти из условия равенства единице отношения $V(\varphi)/V_{\max}$ с точностью до членов четвертого порядка по фазе ϕ :

$$\frac{V(\varphi)}{V_{\max}} = 1 + O(\varphi^4). \quad (5)$$

Разрешая получившееся уравнение относительно U_{FT}/U_{RF} , найдем

$$\frac{U_{FT}}{U_{RF}} = -1/9. \quad (6)$$

Соотношение (6) является частным случаем более общего. «Flat-top» система может быть реализована с помощью произвольной гармоники (с номером n) основного напряжения. В этом случае отношение амплитуд напряжений будет равно $U_{FT}/U_{RF} = -1/n^2$, как это было отмечено в [6].

Отношение напряжений U_{30}/U_{10} на зазоре основного и «flat-top» дуанта должно быть равно

$$\frac{U_{30}}{U_{10}} = \frac{U_{FT}}{U_{RF}} \frac{\cos\left(\frac{h_0(\delta_1 - \delta_0)}{2}\right)}{\cos\left(\frac{3h_0(\delta_3 - \delta_{30})}{2}\right)}. \quad (7)$$

Для проектных параметров основной и «flat-top» ВЧ-систем имеем

$$\frac{U_{30}}{U_{10}} = 0, 1. \quad (8)$$

Соотношение (8) и определяет указанное выше максимальное напряжение на дуанте «flat-top» системы $U_{30 \max} = 13$ кВ.

4. ДОПУСКИ НА ПАРАМЕТРЫ «FLAT-TOP» СИСТЕМЫ

Возможные ошибки фазирования основной и «flat-top» системы, а также отличие напряжений от оптимальных значений приводит к увеличению импульсного разброса частиц и сужению допустимой области фаз ускоряющего ВЧ-поля.

4.1. Допуск на фазу «flat-top» системы. Фазовый сдвиг «flat-top» напряжения на $1,5^\circ$ приводит к удвоению энергетического разброса в пучке. Это иллюстрируется рис. 2, на котором показана зависимость суммарного напряжения ВЧ-системы циклотрона от фазы в отсутствие фазового сдвига (кривая 1) и при фазовом сдвиге $1,5^\circ$ (кривая 2). Из рисунка видно, что в области фаз $-20 \leq \varphi \leq 20^\circ$ импульсный разброс частиц во втором случае удваивается.

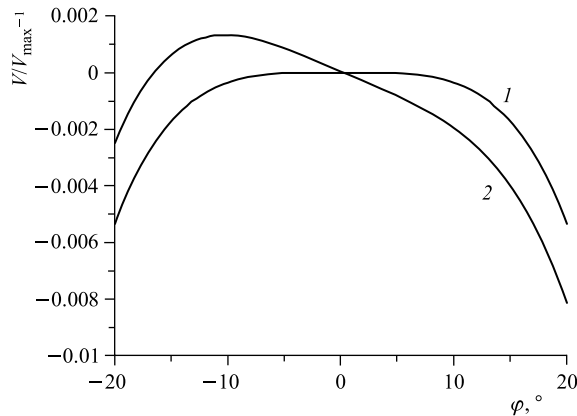


Рис. 2. Суммарное напряжение ВЧ-системы. 1 — фазовый сдвиг отсутствует; 2 — фазовый сдвиг $1,5^\circ$

4.2. Допуск на амплитуды напряжений. Отношение $(U_{FT}/U_{RF})_{\min}$, определяемое формулой (6), соответствует относительному энергетическому разбросу кинетической энергии частиц в пучке $|\delta W/W| \leq 0,5\%$ в области фаз ускоряющего напряжения

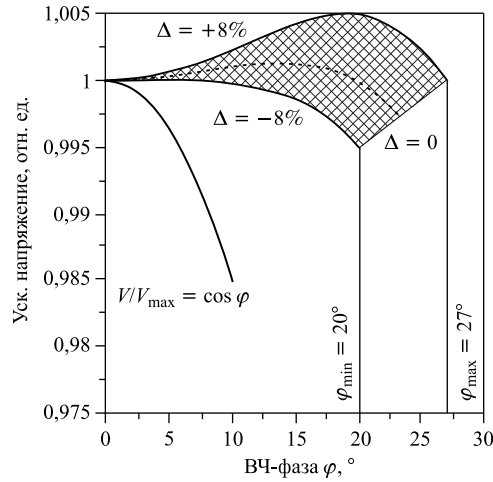


Рис. 3. Эффективное ускоряющее напряжение для граничных значений параметра Δ

$|\varphi| \leq \varphi_{\min} = 20^\circ$. При уменьшении U_{FT}/U_{RF} допустимая область фаз уменьшается, что нежелательно. Увеличение отношения U_{FT}/U_{RF} до значения $(U_{FT}/U_{RF})_{\max} = 1,16 (U_{FT}/U_{RF})_{\min}$ приводит к увеличению фазовой протяженности ускоряемого сгустка $|\varphi| \leq \varphi_{\max} = 27^\circ$, при той же максимальной величине энергетического разброса $\delta W/W$. Дальнейшее увеличение отношения напряжений по сравнению с максимальным значением $(U_{FT}/U_{RF})_{\max}$ приводит к превышению энергетическим разбросом допустимого значения $\delta W/W = 0,5\%$.

Поэтому разрешенная величина отношения U_{FT}/U_{RF} находится в интервале значений, определяемых неравенством

$$|\Delta| \leq 8\%, \quad (9)$$

где

$$\frac{U_{FT}}{U_{RF}} = \left(\frac{U_{FT}}{U_{RF}}\right)_0 (1 + \Delta), \quad \left(\frac{U_{FT}}{U_{RF}}\right)_0 = \frac{(U_{FT}/U_{RF})_{\max} + (U_{FT}/U_{RF})_{\min}}{2}. \quad (10)$$

Эффективное ускоряющее напряжение $V(\varphi)/V_{\max}$ для граничных значений параметра Δ показано на рис. 3. Пунктирная линия соответствует случаю $U_{FT}/U_{RF} = (U_{FT}/U_{RF})_0$. Допустимая рабочая область ускоряющего напряжения отмечена штриховкой.

5. НЕИЗОХРОННОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ

Конечную энергию иона при ускорении на N оборотах можно найти, просуммировав увеличение энергии частицы ΔW (1) на каждом обороте:

$$W_N = W_0 + \sum_{n=1}^N \frac{Z}{A} eV(u + \varphi_n). \quad (11)$$

Здесь W_0 — энергия инжекции; $u = \varphi - \varphi_n$, φ_n — центральная фаза ускоряемого сгустка частиц на n -м обороте, меняющаяся вследствие нарушения изохронности движения частиц. Разложим правую часть равенства (11) в ряд по степеням φ_n вплоть до членов

второго порядка и проведем суммирование в предположении, что распределение частиц относительно центра не меняется в процессе ускорения. В результате получим

$$\frac{W_N}{W_{\max}} \cong \frac{1}{V_{\max}} \left[V(u) + V'(u)\bar{\varphi} + \frac{1}{2}V''(u)\overline{\varphi^2} \right], \quad (12)$$

где $W_{\max} = N \frac{Z}{A} e V_{\max}$ — энергия центральной частицы, а величины $\bar{\varphi}$ и $\overline{\varphi^2}$ определены как

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi_n, \quad \overline{\varphi^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi_n^2. \quad (13)$$

В качестве примера на рис. 4 показано изменение центральной фазы в процессе ускорения ионов $^{238}\text{U}^{42+}$ в циклотроне ДЦ-280.

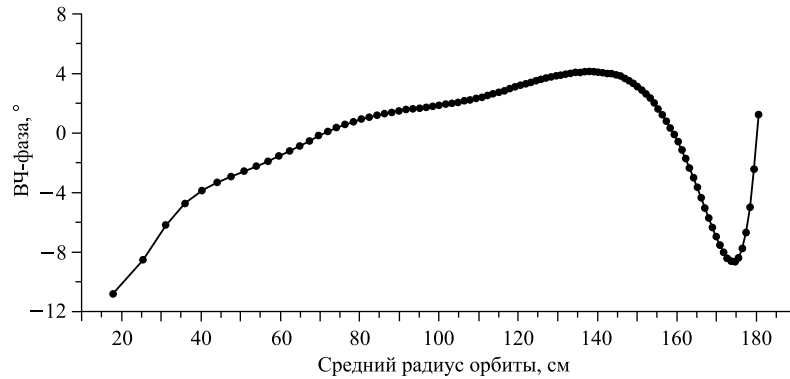


Рис. 4. Фазовое движение иона $^{238}\text{U}^{42+}$

В данном режиме работы надлежащим подбором начальной фазы центра пучка обеспечено выполнение равенства $\bar{\varphi} = 0$. В этом случае $\overline{\varphi^2} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ и влияние смещения фазы центра пучка на конечное распределение энергии частиц пучка может быть устранено небольшим изменением амплитуд напряжений основного U_{RF} и «flat-top» U_{FT} дуантов:

$$U_{\text{RF}} = \frac{U_{\text{RF0}}}{1 - \overline{\varphi^2}/2}, \quad U_{\text{FT}} = \frac{U_{\text{FT0}}}{1 - 9\overline{\varphi^2}/2}, \quad (14)$$

где величины $U_{\text{RF0}}, U_{\text{FT0}}$ соответствуют идеальному изохронизму движения частиц.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

Компоновка центральной области циклотрона показана на рис. 5.

Эффективность использования «flat-top» ВЧ-системы с двумя дополнительными (независимыми) дуантами при ускорении на начальных оборотах в центральной области циклотрона была исследована на основе тестового режима ускорения пучка ионов с $A/Z =$

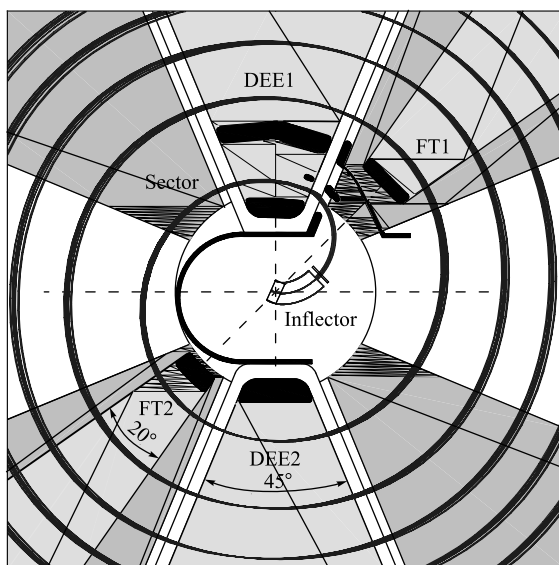


Рис. 5. Эскиз центральной области циклотрона ДЦ-280. DEE1, 2 — дуанты основной ускоряющей системы; FT1, 2 — дуанты «flat-top» системы

4 в магнитном поле $B_0 = 0,9$ Тл. Для рассматриваемого режима напряжение инъекции $U_{inj} = 55$ кВ. Напряжение на дуантах принято равным $U_{RF} = 130$ кВ.

Для сравнения рассмотрены три варианта использования основной и «flat-top» ВЧ-систем:

1. Ускорение без «flat-top» ВЧ-системы.
2. Ускорение с «flat-top» системой, совмещенной с основной ВЧ-системой, когда дополнительная третья гармоника ускоряющего напряжения возбуждается в зазоре основных дуантов.
3. Ускорение с независимой «flat-top» ВЧ-системой.

Фазы ВЧ-поля и положение ускоряющих зазоров основной и «flat-top» ВЧ-систем во втором и третьем рассмотренных вариантах показаны на рис. 6.

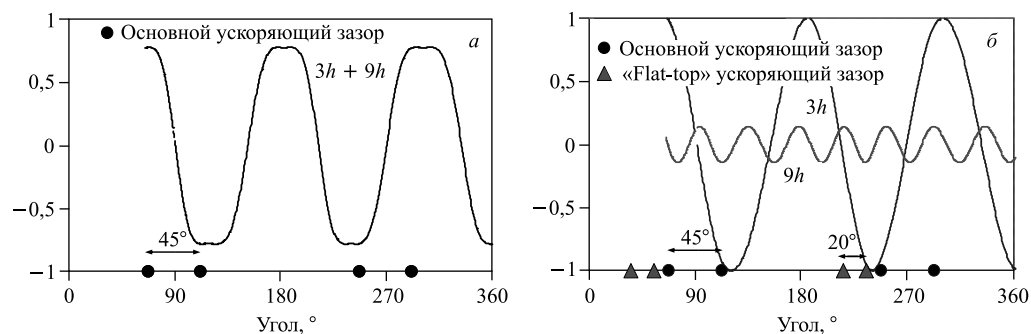


Рис. 6. Фаза и положение ускоряющих зазоров основной и «flat-top» ВЧ-систем во втором (а) и третьем (б) рассмотренных вариантах

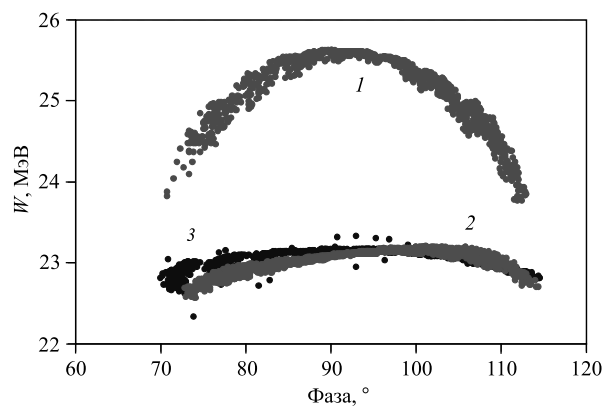


Рис. 7. Распределение энергии ионов тестового пучка на пятом обороте в центральной области циклотрона для трех рассматриваемых вариантов

Сравнительный траекторный анализ различных вариантов показал уменьшение энергетического разброса в тестовом пучке на пятом обороте с $\approx 12\%$ в первом варианте (без «flat-top» ВЧ-системы) до $\approx 2\%$ во втором и третьем вариантах (рис. 7).

При этом использование «flat-top» системы приводит также к уменьшению радиального размера пучка. Причем в третьем варианте независимой «flat-top» ВЧ-системы это уменьшение наиболее эффективно (рис. 8). Существенным преимуществом независимой

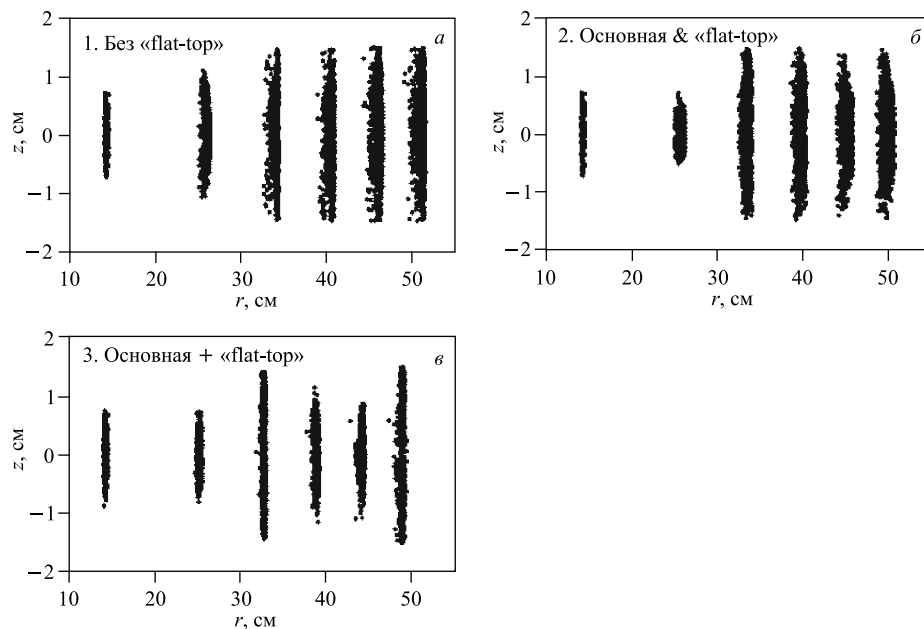


Рис. 8. Поперечное распределение ионов тестового пучка на первых пяти оборотах в центральной области циклотрона для трех рассматриваемых вариантов

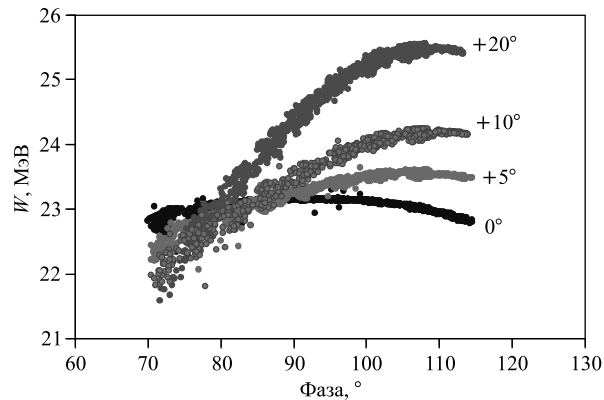


Рис. 9. Распределение энергии ионов тестового пучка на пятом обороте при смещении фазы между основной и независимой «flat-top» ВЧ-системами

«flat-top» ВЧ-системы является снижение амплитуды U_{30} с $0,3 U_{10}$ в случае возбуждения «flat-top» на основных дуантах (7) до $0,1 U_{10}$ в случае использования дополнительных «flat-top» дуантов. Это практически на порядок уменьшает мощность генератора «flat-top» системы.

Фазовый сдвиг между основной и «flat-top» ВЧ-системами приводит к увеличению энергетического разброса в тестовом пучке, как это показано на рис. 9.

Так, для пятого оборота энергетический разброс увеличивается с $\approx 2\%$ в отсутствие фазового смещения до $\approx 6\%$ при фазовом смещении, равном 5° . Этот результат находится в хорошем согласии с оценкой, приведенной в разд. 4.

Таким образом, использование дополнительных «flat-top» дуантов обладает рядом преимуществ по сравнению с вариантом возбуждения дополнительной третьей гармоники ускоряющего напряжения в зазоре основных дуантов, таких как уменьшение поперечного размера пучка и снижение мощности ВЧ-генератора.

Недостатком независимой «flat-top» ВЧ-системы является некоторая сложность совмещения дополнительных дуантов с элементами центральной области.

7. ВЫБОР СТРУКТУРЫ «FLAT-TOP» РЕЗОНАТОРА

Для высокочастотных ускоряющих систем циклотронов применяются разные формы геометрии резонаторов.

Четвертьволновая геометрия резонатора (рис. 10) применена в большинстве действующих и проектируемых в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ циклотронов.

Основным недостатком этой геометрии резонатора является значительное падение ускоряющего напряжения на дуанте по радиусу, что для «flat-top» резонатора циклотрона ДЦ-280 на максимальной частоте составит величину около 60% .

Для улучшения радиального распределения ускоряющего напряжения в резонаторе используется полуволновая ускоряющая структура (рис. 11). Стрелками показано относительное направление ВЧ-токов по штокам.

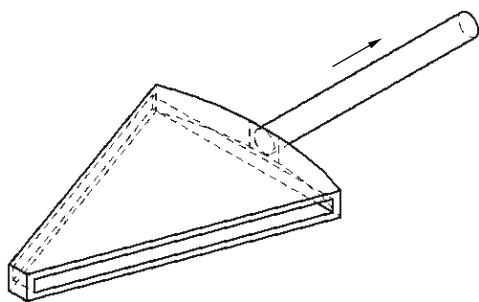


Рис. 10. Геометрия соединения дуанта и штока для четвертьволнового резонатора

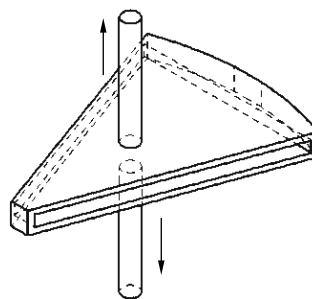


Рис. 11. Геометрия соединения дуанта и штока для полуволнового резонатора

Модификацией полуволновой геометрии является резонатор с изогнутыми штоками (рис. 12) или радиальными плоскими проводниками (рис. 13).

Два плоских проводника благодаря одинаковой направленности ВЧ-токов можно объединить за пределами дуанта в один коаксиальный (рис. 14).

Последняя геометрия «flat-top» резонатора имеет минимальный вертикальный размер для размещения между секторами циклотрона ДЦ-280 (зазор 208 мм), обладает улучшенными свойствами по радиальному распределению ускоряющего напряжения и содержит одну закорачивающую пластину в коаксиальной части для перестройки частоты.

Эта геометрия «flat-top» резонатора и была предложена для дальнейших расчетов.

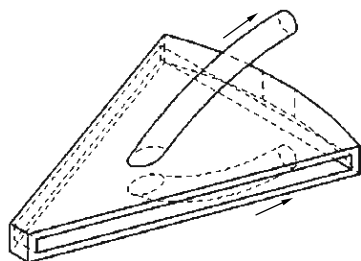


Рис. 12. Геометрия соединения дуанта с изогнутыми штоками. Полуволновой резонатор

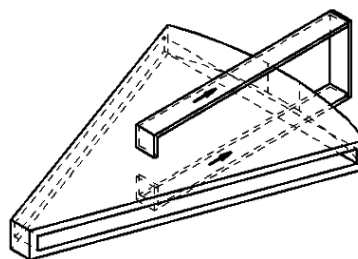


Рис. 13. Геометрия соединения дуанта и штока в виде пластины. Полуволновой резонатор

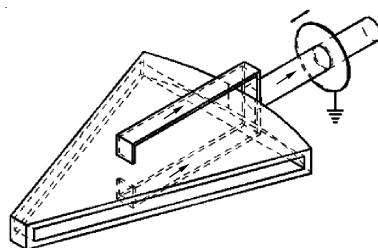


Рис. 14. Эскиз финальной геометрии «flat-top» резонатора

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «FLAT-TOP» РЕЗОНАТОРА

Для проверки работоспособности идеи «flat-top» резонатора с геометрией, представленной на рис. 14, была создана физическая модель в масштабе 1:3, основанная на простейших радиотехнических оценках ее резонансных свойств (рис. 15). На модели произведены измерения диапазона собственных резонансных частот в зависимости от положения закорачивающей пластины и распределения амплитуды ВЧ-напряжения на зазоре «flat-top» дуанта по радиусу.

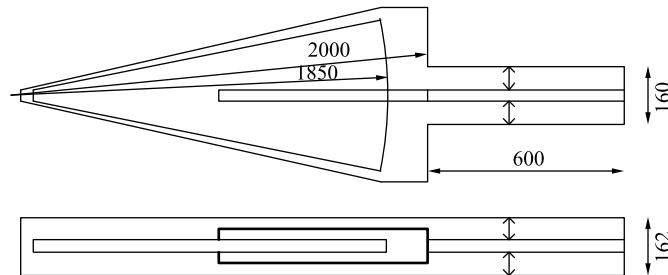


Рис. 15. Вид модели «flat-top» резонатора

Для хода закорачивающей пластины в 200 мм резонансные частоты модели выше требуемых только на 10 %, что подтверждает работоспособность структурного построения резонансной системы.

Исследование распределения напряжения на зазоре дуанта модели «flat-top» резонатора проводилось методом частотного сдвига Δf при внесении в вертикальный зазор дуант–плакировка диэлектрического пробного тела, выполненного в виде цилиндра из эбонита или фторопласта. Сдвиг частоты пропорционален квадрату напряжения в зазоре дуант–плакировка, и для различных точек резонансной системы справедливо соотношение

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{\Delta f_1}{\Delta f_2}}. \quad (15)$$

Результаты некоторых измерений представлены на рис. 16, для различных материалов диэлектрических пробок и модификаций их установки. Штриховым линиям соответствуют измерения, осуществленные с цилиндром из эбонита, а штрихпунктирным линиям — с цилиндром из фторопласта. С каждым цилиндром было произведено по две серии измерений. Первая серия измерений соответствовала положению цилиндра строго в отверстии (черные кривые), вторую серию измерений производили для цилиндра внутри резонатора (серые кривые). Из рисунка видно, что неоднородность распределения ВЧ-напряжения по дуанту доходит до 50 %, что неприемлемо.

Для оптимизации геометрии «flat-top» резонатора необходимо провести вариацию положения соединения дуанта с индуктивной частью, ширины индуктивной части, высоты индуктивной части, высоты дуанта и всего резонатора. Для оптимизации частотного диапазона и энергетических характеристик следует провести вариацию геометрии

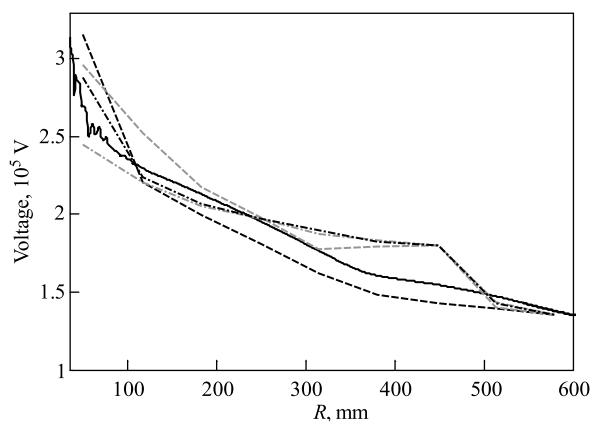


Рис. 16. Зависимость напряжения на дуанте от радиуса для модели 1:3. Резонансная частота 101 МГц

перестраиваемой коаксиальной части. Таким образом, необходимо провести электродинамическое 3D-моделирование. Проведенные 3D-расчеты геометрии физической модели подтвердили существенную неоднородность распределения ВЧ-напряжения по «flat-top» дуанту.

9. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ «FLAT-TOP» РЕЗОНАТОРА

Оптимизация геометрии «flat-top» резонатора проводилась на основе компьютерной модели (рис. 17), созданной с использованием программы SOLID Edge, в которой учтены результаты исследований на физической модели. В компьютерной модели бак резонатора имеет цилиндрическую форму. Произведены и другие изменения геометрии.

В результате оптимизации синтезирована геометрия резонатора с практически постоянным напряжением ускоряющего поля вдоль радиуса (рис. 18). Амплитуда напряжения на дуанте рассчитывалась как интеграл напряженности электрического поля по вертикальному зазору плакировка–дуант.

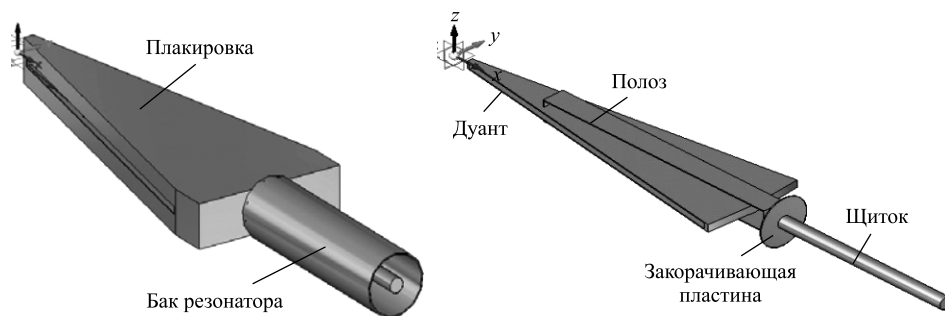


Рис. 17. Вид компьютерной модели «flat-top» резонатора

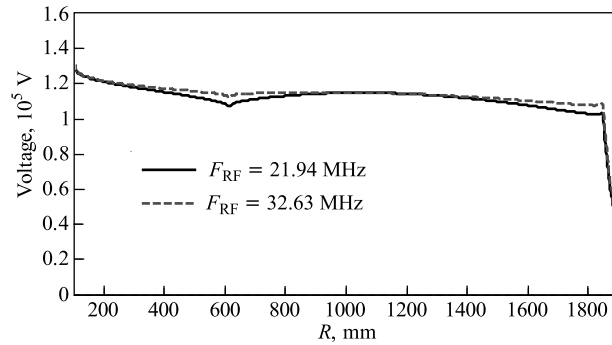


Рис. 18. Зависимость ускоряющего напряжения на дуанте от радиуса для граничных частот проектного диапазона

Таблица 1. Основные параметры «flat-top» резонатора

Частота, МГц	32,63	21,94
Положение закорачивающей пластины, мм	0	415
Суммарная рассеиваемая мощность, кВт	1,4	0,9
Добротность	2551	3208
Амплитуда плотности поверхностного тока, А/см	26,53	21,1

Проведенные расчеты позволили определить плотности поверхностного тока для контактов закорачивающей пластины и ее положения, обеспечивающие получение проектного диапазона частот. Результаты этих и представленных ниже расчетов объединены в табл. 1.

Численный (3D) расчет резонатора также позволяет получить пространственное распределение компонент электромагнитного поля, необходимое для последующего моделирования динамики пучка.

Величина ВЧ-мощности, рассеиваемой в резонаторе, определяет мощность ВЧ-генератора. Для проектирования системы охлаждения резонатора необходимо определить рассеиваемые мощности в узлах с отдельными контурами охлаждения. С этой целью расчетная модель была разделена на части, соответствующие контурам охлаждения, как это показано на рис. 17. Оценка рассеиваемой мощности в резонаторе проводилась для технической меди (электропроводность $5 \cdot 10^7$ См/м). В табл. 2 приведены мощности тепловых потерь на отдельных участках резонатора для максимальной частоты $f = 32,63$ МГц, которые и определяют конструкцию системы охлаждения.

Таблица 2. Рассеиваемые мощности отдельных участков резонатора

Участок резонатора	Длина участка, мм	Мощность, Вт
Дуант	106–1850	172,4
Шток	1960–3010	62,4
Закорачивающая пластина	2015	56,8
Полоз	608–1960	776,3
Плакировка	99–1999	278,7
Бак резонатора	1999–3003	11,4
		Суммарно 1357

10. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Согласно результатам разд. 4 допустимый разброс отношения U_{FT}/U_{RF} амплитуд напряжений основного и «flat-top» дуантов не должен превышать $\pm 8\%$ во всей области радиусов ускоряемых частиц. На рис. 19 показано расчетное [5] радиальное распределение напряжения на основном дуанте циклотрона (точки), соответствующее частоте $f_0 = 10,38$ МГц. Расчетные значения напряжения основного дуанта имеют достаточно большой вычислительный шум. Для оценки отношения амплитуд напряжений использовалось сглаженное распределение напряжения, также показанное на рис. 19 (сплошная кривая). Требуемое радиальное распределение «flat-top» дуанта для частоты $3f_0 = 31,14$ МГц находилось с помощью линейной интерполяции результатов расчета, представленных на рис. 18. Полученное распределение приведено на рис. 20.

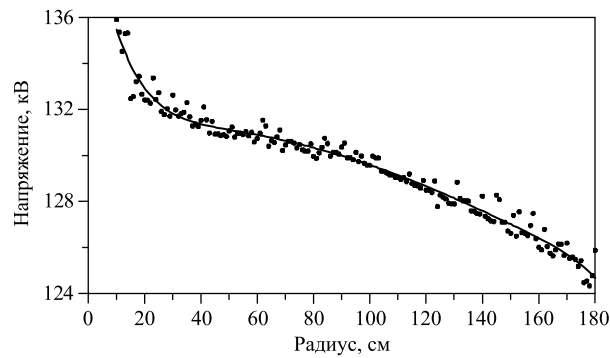


Рис. 19. Расчетное напряжение основного дуанта на частоте $f_0 = 10,38$ МГц

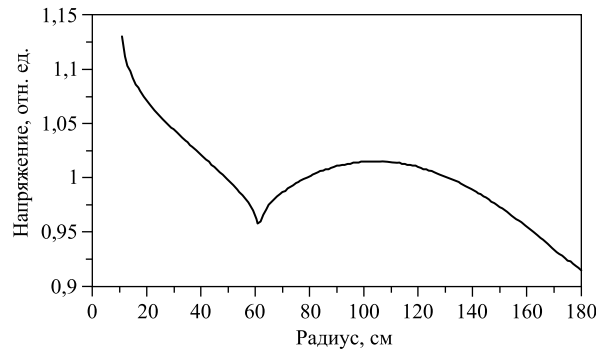
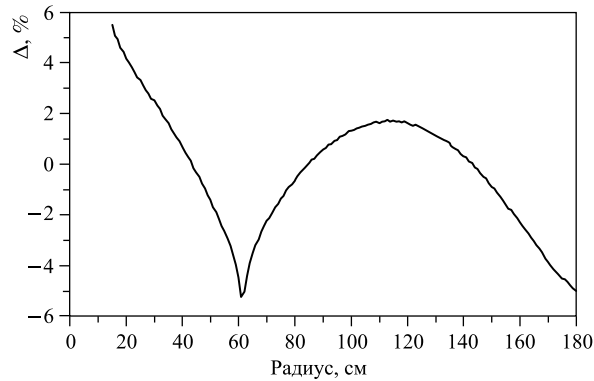


Рис. 20. Расчетное напряжение «flat-top» дуанта на частоте $3f_0 = 31,14$ МГц

В соответствии с формулами (9), (10) величина Δ :

$$\Delta = \frac{U_{FT}/U_{RF} - \overline{U_{FT}/U_{RF}}}{\overline{U_{FT}/U_{RF}}}, \quad (16)$$

где $\overline{U_{FT}/U_{RF}}$ — среднее значение отношения амплитуд напряжений во всей области радиусов, должна находиться в пределах $\pm 8\%$. Изменение Δ в рабочей области радиусов показано на рис. 21.

Рис. 21. Величина Δ в рабочей области радиусов

Таким образом, отношение амплитуд напряжений лежит в допустимом диапазоне значений для всей рабочей области радиусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция и определены основные параметры резонатора «flat-top» системы циклотрона ДЦ-280. Использование независимых «flat-top» дуантов на порядок уменьшает мощность ВЧ-генератора по сравнению с вариантом возбуждения дополнительной третьей гармоники ускоряющего напряжения в зазоре основных дуантов. Оценены допуски на фазовый сдвиг основной и «flat-top» ВЧ-систем, а также на возможную ошибку в величине амплитуд ВЧ-напряжений. Проведено моделирование динамики частиц с учетом воздействия «flat-top» системы, приводящего к значительному уменьшению энергетического разброса и поперечных размеров пучка.

Измерения основных параметров физической модели «flat-top» резонатора находятся в хорошем соответствии с результатами электродинамического компьютерного моделирования, в частности, для одинаковых положений закорачивающей пластины различие между экспериментальной и расчетной частотой составляет около 1 %.

Оптимизирована геометрия высокочастотного «flat-top» резонатора ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280. Получено требуемое радиальное распределение напряжения в зазоре резонатора. Расчетная мощность ВЧ-генератора «flat-top» системы составляет 1,4 кВт.

Отношение амплитуд напряжений основного и «flat-top» резонаторов лежит в допустимом диапазоне значений для рабочей области радиусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gulbekyan G. et al.* Status Report and Future Development FLNR JINR Heavy Ions Accelerators Complex // Proc. of 11th Intern. Conf. on Heavy Ion Acc. Technol., Venezia, Italy, June 8–12, 2009. P. 59.
2. *Гульбекян Г. Г.* Проект сильноточного циклотрона тяжелых ионов DC-280 // Тр. IX Междунар. семинара по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В. П. Саранцева, Алушта, Украина, 17–21 сент., 2011 г.

3. *Hatanaka K. et al.* RCNP Cyclotron Facility // Proc. of 11th Intern. Conf. on Heavy Ion Acc. Technol., Venezia, Italy, June 8–12, 2009. P. 64.
4. *de Villiers J.G. et al.* A Flat-Topping System for the Separated Sector Cyclotron at iThemba LABS // Proc. of XVII Intern. Conf. on Cyclotron and Their Appl., Tokyo, Oct. 18–22, 2004.
5. Гульбежан Г.Г. и др. Высокочастотная ускоряющая система циклотрона ДЦ-280 // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 8. С. 89–97.
6. *Fukuda M. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2003. V. 74. P. 2293.

Получено 24 октября 2012 г.