

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ОСОБЕННОСТИ УСКОРИТЕЛЯ ДЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ  
С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

© 2023 г. Ю. В. Сеничев<sup>а</sup> \*, А. Е. Аксентьев<sup>а</sup>, А. А. Завадцев<sup>б</sup> \*\*, А. А. Мельников<sup>а</sup>,  
А. П. Клачков<sup>с</sup>, Д. А. Завадцев<sup>б</sup>, Д. В. Чуранов<sup>б</sup>, В. С. Юцкевич<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

<sup>б</sup>ООО “Нано Инвест”, Москва, 111394 Россия

<sup>с</sup>ООО “Колибри Инжиниринг”, Москва, 129110 Россия

\*E-mail: y.senichev@inr.ru

\*\*E-mail: azavadtsev@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 31.07.2022 г.

Принята к публикации 31.07.2022 г.

Главной особенностью дейтронного ускорителя является то, что в случае ускорения частиц с соотношением заряда к массе  $1 : 2$ , длина резонатора практически удваивается по сравнению с ускорителем протонов на ту же энергию. В случае конечной энергии, превышающей 1.0 МэВ на нуклон длина резонатора становится критически большой  $L_{cav} \approx 3\lambda$ , где  $\lambda$ -длина волны рабочей моды TE211, что приводит к малому частотному разделению между рабочей квадрупольной модой TE211 и дипольными модами TE11n. Для разделения мод предлагается использовать окна связи между соседними сегментами резонатора, которые в свою очередь изменяют распределение поля вдоль резонатора. Равномерность восстанавливается с помощью плунжеров, размещенных вдоль резонатора в каждом из четырех сегментов. Результатом работы является расчет ускоряющего резонатора RFQ со следующими основными параметрами: тип ионов – дейтроны или  $He^{++}$ , рабочая частота 202 МГц, энергия инжекции 75 кэВ, длина 4.3 м, импульсная мощность питания не более 300 кВт, энергия ускоренных ионов 1.25 МэВ/нуклон, импульсный ток дейтронов 50 мА и  $He^{++}$  10 мА. На основе выполненных электродинамических расчетов и расчетов динамики пучка выполнено конструирование резонатора RFQ.

**Ключевые слова:** дейтрон, альфа-частица, ускоритель с пространственно-однородной фокусировкой, динамика пучка, электродинамика ВЧ резонаторов, каплер, тонер, вакуум

DOI: 10.56304/S2079562922050463

1. ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемый линейный ускоритель ионов с отношением заряд/масса  $Z/A = 1/2$ , в качестве которых рассматриваются дейтроны  $D^+$  и альфа-частицы  $^4He^{2+}$ , включает источник ионов, LEVT (Low Energy Beam Transport), ускоряющую систему малой энергии на основе резонатора RFQ с пространственно-однородной фокусировкой [1], ускоряющую систему большой энергии на основе ИР резонаторов. Основные требования к RFQ приведены в табл. 1.

На рис. 1 показан профиль электродов резонатора RFQ. По мере ускорения с номером периода растет модуляция электродов и период ускорения  $L_{ac} = \beta\lambda/2$ . Средний радиус апертуры  $R_0 = a(m + 1)/2$  и  $R_1$  неизменны по всей длине резонатора.

Основные параметры RFQ выбраны методом пошагового приближения: рабочая частота  $f = 202$  МГц, предел по Килпатрику  $E_{kilp} = 150$  кВ/см,

максимальное поле на поверхности  $E_{max} = 275$  кВ/см, градиент поперечного фокусирующего поля

Таблица 1. Основные номинальные параметры RFQ

Рабочая частота, МГц	202
Напряжение инжекции ионов, кВ	75
Импульсный ток ионов на входе RFQ, мА	10 (64*)
Средний ток ионов на входе RFQ, мА	1.25 (8*)
Поперечный эмиттанс на входе RFQ (норм., rms,) до, мм мрад	0.25π
Импульсный ток ионов на выходе RFQ, мА	8 (40*)
Средний ток ионов на выходе RFQ, мА	1 (5*)
Прохождение при импульсном токе ≤12 мА, не менее	70%
Импульсная мощность ВЧ питания, не более, кВт	300

\* Значения тока дейтронов в скобках соответствуют специально электрически и механически настроенному Линаку.

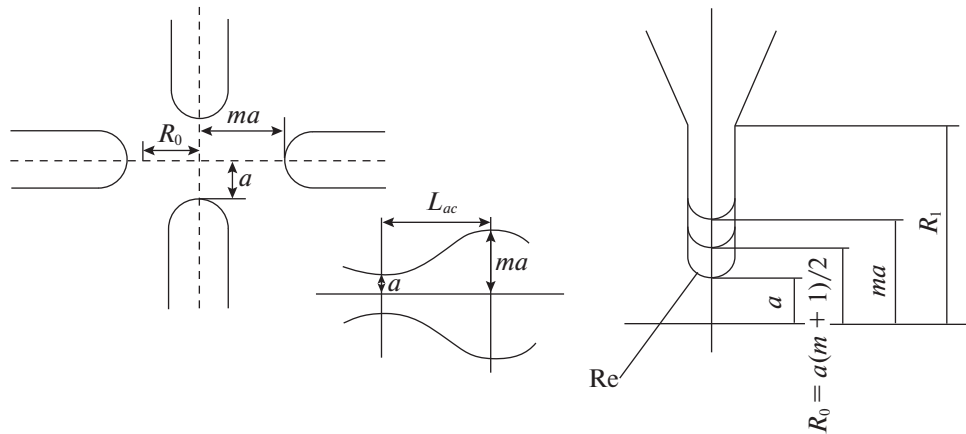


Рис. 1. Профиль электродов резонатора RFQ.

$G = dE/dx = 487$  кВ/см<sup>2</sup> (или  $G = dE/dy$ ), квадрупольное поле на границе  $E_{qdr} = GR_0 = 204.8$  кВ/см,  $K_{kilp} = E_{max}/E_{kilp} = 1.8$ ,  $K_{max} = E_{max}/E_{qdr} = 1.32$ , межэлектродный потенциал  $U_0 = ER_0 = 86$  кВ.

## 2. РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ RFQ

После определения основных параметров RFQ был рассчитан профиль электродов на всей длине ускорителя, включая изменение длины ускоряющего периода  $L_{ac}(i) = \beta(i)\lambda/2$ , глубины модуляции  $m(i)$  и синхронной фазы  $\phi_s(i)$  с номером периода.

С точки зрения закона изменения синхронной фазы с номером периода RFQ включает четыре части [2].

На каждой из этих частей закон изменения  $\phi_s(i)$  имеет различный характер (см. рис. 2):

– **согласователь** (matcher) по радиальному движению с расширяющим раструбом и нулевой модуляцией электродов, необходимость которого возникает при росте потерь по радиальному движению

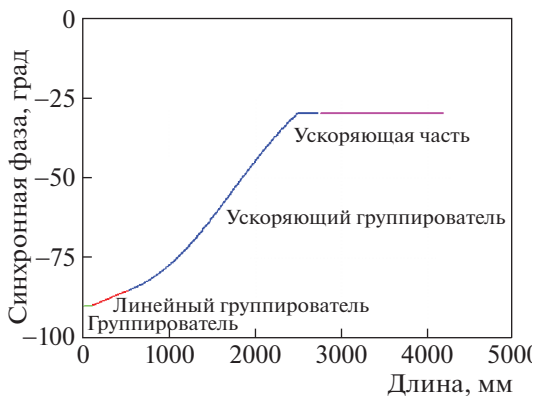


Рис. 2. Изменение синхронной фазы на всей длине ускорителя.

или при значительном росте поперечного эмиттанта; в дальнейшем согласователь был заменен на дополнительные ячейки группирователя;

– **группирователь** (buncher) с одинаковой длиной ускоряющего периода, с определенным количеством ускоряющих периодов и необходимой модуляцией электродов для обеспечения начальной группировки для увеличения захвата;

– **ускоряющий группирователь** (gentle buncher), обеспечивающий ускорение и формирование пучка в квазистационарном режиме с одновременным переходом равновесной фазы от фазы близкой к значению  $\phi_s = -90^\circ$  до конечной равновесной фазы  $\phi_s = -30^\circ$ ;

– **ускоряющая часть** (accelerator) ускоряет пучок до конечной энергии 2.5 МэВ с постоянной равновесной фазой  $\phi_s = -30^\circ$ .

В настоящем проекте было выбрано значение начальной синхронной фазы  $\phi_s = 85^\circ$ . При этом коэффициент захвата составил 75% для нулевого тока.

Если начальная синхронная фаза в ускоряющем группирователе в режиме квазистационарности равна  $\phi_s = -90^\circ$ , длина RFQ становится бесконечной [3]. Отступая от значения  $\phi_s = -90^\circ$ , мы сокращаем длину основной части ускорителя. Но при этом, нарушая режим квазистационарности, мы уменьшаем коэффициент захвата в ускоритель. Из рис. 3 видно, что уменьшение равновесной фазы с  $-85^\circ$  до  $-89.5^\circ$  приводит к удлинению ускоряющей части (gentle buncher) практически на метр.

ВЧ мощность подается в резонатор по четырем коаксиальным фидерам типа 4.5" EIA с петлевыми каплерами. Каплер имеет фланец типа 4.5" EIA, керамический изолятор, петлю связи и вращающийся фланец CF100 для присоединения к резонатору. Выполнена настройка каплеров, обеспечивающая номинальный коэффициент

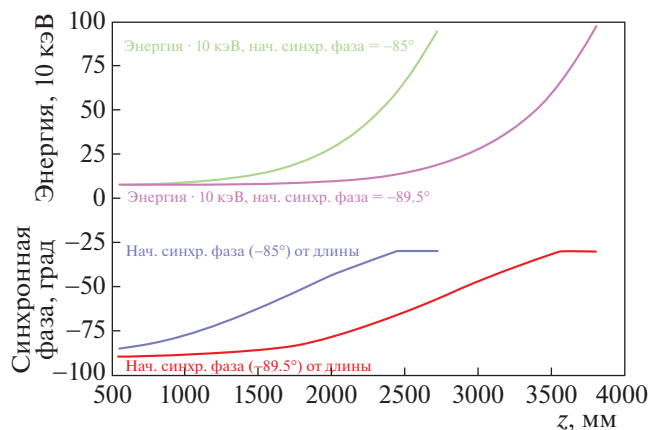


Рис. 3. Две опции RFQ с различной начальной фазой  $-85^\circ$  и  $-89.5^\circ$ .

связи четырех фидеров с резонатором близкий к 1. Конфигурация окон связи, плунжеров и каплеров показана на рис. 4. Распределение поля после настройки при мощности питания 250 кВт приведено на рис. 5. Этот практически одинаковый результат получен в электростатической и электродинамической моделях.

### 3. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ RFQ

Для частотного разделения рабочей (квадрупольной) моды и нерабочих дипольных мод использованы окна магнитной связи в электродах (8 шт. на каждом электроде), что привело к неоднородности электрического поля вдоль оси резонатора, для компенсации которой до равномерного распределения использованы 20 тюнеров (плунжеров). Таким образом, было получено разделение частот рабочей и ближайшей дипольной моды 2.968 МГц. Полная длина электродов составляет 4272.82 мм. Получено расчетное значение  $K_{\text{kilp}} = 1.83$ .

### 4. ДИНАМИКА ПУЧКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА

Расчет динамики пучка производился в электростатических полях, меняющихся по гармоническому закону. Напряжение инжекции  $U = 75$  кэВ. Ненормализованный г.т.с. эмиттанс  $\epsilon_x = 22.37$  мм мрад. Для моделирования динамики пучка с учетом сил пространственного заряда использовался метод “крупных частиц”. Исследование динамики пучка производилось для токов инжекции: 10, 50, 100, 150, 200 мА. Основные результаты расчета динамики пучка приведены в табл. 2.

Для расчетов использовались параметры входного пучка (ток, эмиттанс, радиус), полученные в процессе разработки инжектора ионов. Как пример, на рис. 6 показан продольный фазовый портрет на выходе RFQ для тока 10 и 100 мА соответственно. Для тока в диапазоне до 10 мА коэффициент захвата 75%, ширина по фазе  $0.3\pi = 54^\circ$ , синхронная фаза  $90^\circ + 0.31\pi = -34^\circ$ , средняя энергия 2520 кэВ.

Конструкция резонатора RFQ показана на рис. 7.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнены исследования, необходимые для конструирования дейтронного ускорителя RFQ. На начальном этапе пошагово оптимизированы основные параметры ускорителя: средний радиус апертуры, радиус наконечника электродов, максимальное допустимое значение напряженности поля, исходя из предела по Килпатрику  $E_{\text{max}} = 275$  кВ/см. На последнем шаге оптимизации была посчитана глубина модуляции электродов и длина периода ускорения в зависимости от номера периода, что в полной мере определяет геометрию электродов. В данной конфигурации электродов было посчитано распределение поля в электродинамике и электростатике. С учетом того, что характерное расстояние между электродами более чем на два порядка меньше длины вол-

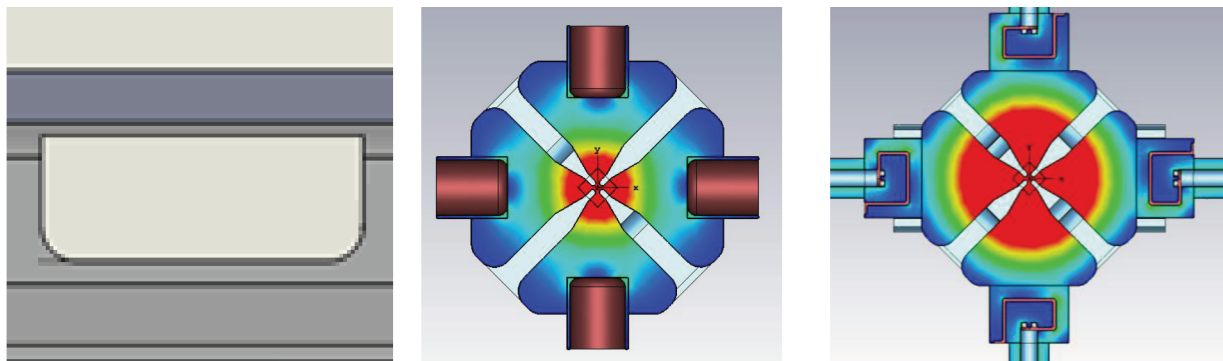


Рис. 4. Конфигурация окон связи, плунжеров и вводов мощности.

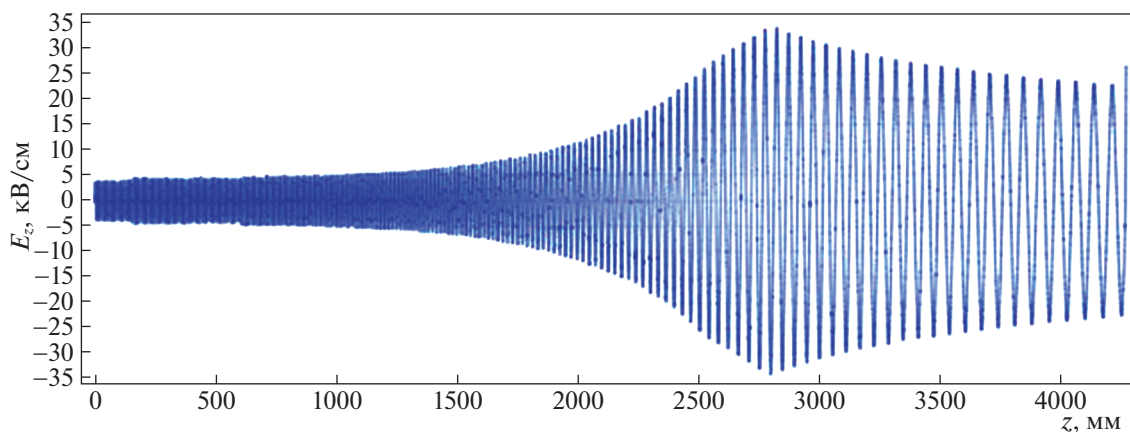


Рис. 5. Продольное распределение модуля ускоряющего поля на оси.

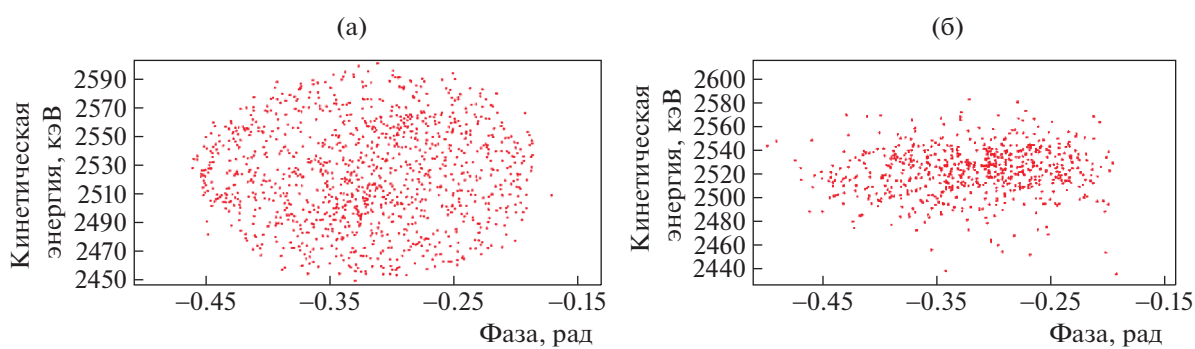


Рис. 6. Продольный фазовый портрет на выходе при токе инжекции 10 и 100 мА.

ны рабочего колебания работает квазистатическое приближение в электродинамике, что дало хорошее совпадение значения полей в обоих приближениях в межэлектродном пространстве.

В работе была посчитана 3D динамика пучка в диапазоне 0–200 мА в реальных 3D полях. Результатом этих расчетов является тот факт, что в диапазоне 10 мА коэффициент захвата составляет остается практически неизменным 75%. При

100 мА коэффициент захвата уменьшается до величины 45%. Падение коэффициента захвата с током связано с тем, что начальный участок ускорителя, на котором формируется пучок был выбран на метр короче с целью уменьшения общей длины ускорителя.

Расчеты электродинамики включили в себя получение требуемого значения резонансной частоты квадрупольной моды и требуемого частот-

Таблица 2. Основные результаты расчета динамики пучка в RFQ

Ток на входе, мА	0	10	50	100	150	200
Rms радиус пучка на входе, мм	0.7	0.85	0.88	0.925	0.95	1.05
Ток на выходе, мА	0	7.5	30.5	45	49	50
Rms радиус пучка на выходе, мм	0.7	0.85	0.88	0.925	0.95	1.05
Вых. $\epsilon_x$ (г.т.с., ненорм.), $\mu$ мм мрад	6.1	6.1	6.1	6.1	6.5	7.1
Коэффициент захвата, %	75	75	61	45	32.5	25

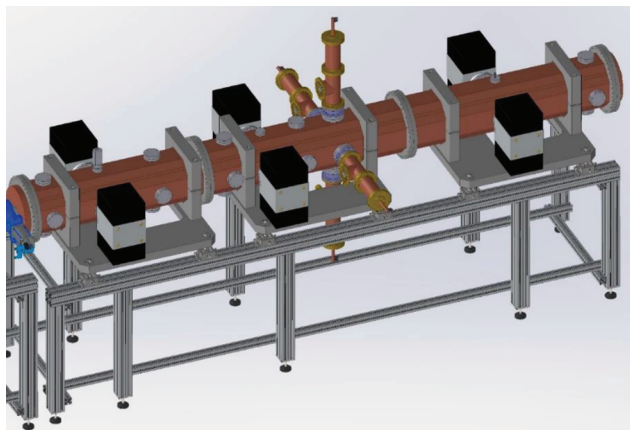


Рис. 7. Эскиз сборочного чертежа RFQ.

ного разделения ее с ближайшими модами. Разделение достигается за счет введения окон связи

на лопастях резонатора. Компенсация искажений поля из-за окон связи достигалась соответствующей расстановкой плунжеров вдоль резонатора в каждом из квадрантов резонатора.

Для выполнения расчетов динамики пучка были написаны программы для определения геометрии электродов и блок расчета сил пространственного заряда для 3D программы, встроенной в программу COMSOL.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Капчинский И.М., Тепляков В.А.* // Приб. техн. эксперим. 1970. Т. 2. С. 19–22.
2. *Fu Q. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2017. V. 20 (12). P. 120101.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.120101>
3. *Сеничев Ю.В.* Продольное группирование пучка высокочастотным инжектором с рогостранственно-однородной фокусировкой. Препринт № П-0151. 1980. Москва: ИЯИ.

## Features of a Deuteron Accelerator Based on the RFQ Structure

Yu. V. Senichev<sup>1</sup>, \*, A. E. Aksentiev<sup>1</sup>, A. A. Zavadtsev<sup>2</sup>, \*\*, A. A. Melnikov<sup>1</sup>,  
A. P. Klachkov<sup>3</sup>, D. A. Zavadtsev<sup>2</sup>, D. V. Churanov<sup>2</sup>, and V. S. Yutskevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

<sup>2</sup>Nano Inves LLC, Moscow, 111394 Russia

<sup>3</sup>Colibri Engineering LLC Moscow, 129110 Russia

\*e-mail: y.senichev@inr.ru

\*\*e-mail: azavadtsev@yandex.ru

Received July 19, 2022; revised July 31, 2022; accepted July 31, 2022

**Abstract**—In the case of acceleration of particles with a charge-to-mass ratio of 1 : 2, the length of the cavity is practically doubled compared to a proton accelerator for the same energy. At an output energy exceeding 1.0 MeV per nucleon, the cavity length becomes large  $L_{\text{cav}} \approx 3 \lambda$ , where  $\lambda$  is the wavelength of the TE<sub>211</sub> working mode, which leads to a critically small frequency separation between the working TE<sub>211</sub> quadrupole mode and the TE<sub>11n</sub> dipole modes. For mode separation, it is proposed to use coupling windows between neighboring cavity segments, which in turn change the field distribution along the cavity. Uniformity is restored with the help of plungers located along the cavity in each of the 4 segments. The result of the work is the calculation of the RFQ accelerating cavity with the following main parameters: ion type – deuterons or He<sup>++</sup>, operating frequency 202 MHz, injection energy 75 keV, length 4.3 m, pulse power not more than 300 kW, energy of accelerated ions 1.25 MeV/nucleon, pulse current of deuterons 50 mA and He<sup>++</sup> 10 mA. Based on the performed electrodynamic and beam dynamics calculations, the RFQ cavity was designed.

**Keywords:** deuteron, alpha particle, RFQ accelerator, beam dynamics, electrodynamic of RF cavity, coupler, tuner, vacuum