

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.65

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
УСКОРИТЕЛЯ VITA¹

© 2025 г. Г. М. Остреинов^a, С. С. Савинов^a, И. М. Щудло^a, С. Ю. Таскаев^{a, b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

* e-mail: G.M.Ostreinov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 27.02.2024 г.

Принята к публикации 11.03.2024 г.

Рассмотрен режим “мягкого” ввода пучка ионов в ускоритель VITA, с помощью электростатической Q-spout линзы (предускоряющего электрода). Проведены аналитические и численные расчеты траекторий, фазового портрета и эмиттанса пучков протонов и дейтронов в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ. Показано, что использование предускоряющей электростатической линзы позволяет избежать перефокусировки пучка сильной входной линзой ускорителя и улучшить его прохождение через ионно-оптический тракт. В таком режиме фокусировки фазовый портрет пучка протонов менее чувствителен к изменению тока и энергии ионов, что актуально для установки медицинского применения и его использования в других приложениях.

DOI: 10.7868/S3034564225070059

1. ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики СО РАН разработан линейный электростатический тандемный ускоритель оригинальной конструкции, получивший название ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией VITA. Основным применением ускорителя, является проведение всесторонних исследований в области бор-нейтронзахватной терапии (БНЗТ) [1]. Для создания нейтронного пучка с интенсивностью и энергией, необходимой для БНЗТ, используется реакция ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ с пороговой энергией 1882 кэВ. Исходная оптическая система ускорителя проектировалась для транспортировки пучка протонов с током 10 мА и энергией более 2 МэВ. По мере усовершенствования установки, она стала применяться для ряда других приложений, таких как спектроскопия поверхностей с помощью обратного

резерфордовского рассеяния, измерение дифференциального сечения в ядерных реакциях ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma){}^4\text{Li}$, а также для радиационного тестирования материалов с помощью быстрых нейтронов [1]. Таким образом, в различных экспериментах ускоритель должен оперировать в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ и токов в диапазоне от 1 нА до 10 мА. Однако оптимальная транспортировка ионного пучка через ускоритель осуществима лишь в ограниченном диапазоне значений энергии. Причиной этого является входная электростатическая линза, возникающая в области соединения низкоэнергетического тракта и ускорителя (рис. 1). Фокусное расстояние такой линзы f пропорционально отношению энергии инжектируемого пучка к изменению напряженности $f \sim \sim 4V/\Delta E$ [2], где V – потенциал, соответствующий энергии ионов, а ΔE – изменение напря-

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

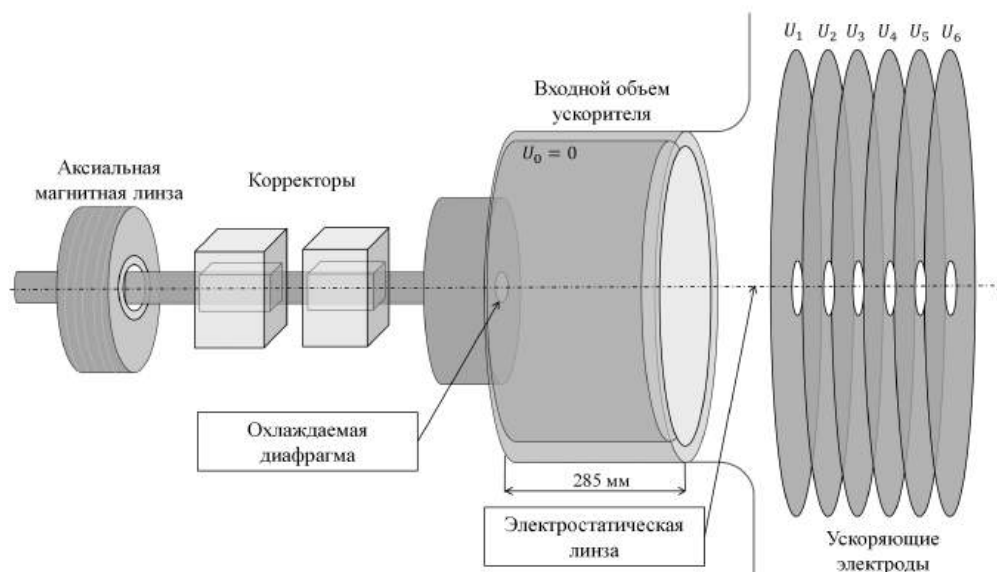


Рис. 1. Схема низкоэнергетического тракта ускорителя ВИТА.

женности поля на апертуре. За счет большого градиента напряженности между областью, свободной от поля, и ускоряющими зазорами, где напряженность поля достигает 25 кВ/см, воздействие на оптику пучка в ускорителе является определяющим. При общей протяженности ускорителя 2 м фокусное расстояние линзы при напряжении на высоковольтном электроде 1.15 МВ и энергии инжекции 21 кэВ составляет всего около 5 см, а при напряжении 200 кВ уже примерно 54 см. Очевидно, что такой разброс фокусных расстояний при работе ускорителя требует дополнительного фокусирующего элемента. В текущей оптической конфигурации компенсация фокусирующего действия вход-

ной электростатической линзы достигается схемой с “жесткой” фокусировкой (рис. 2а), когда в ускоритель вводят сильно расходящийся ионный пучок малого радиуса. Такой пучок можно получить только путем его перефокусировки с помощью магнитной линзы непосредственно перед входом в ускоритель.

В статье описывается модернизированная оптическая система, которая предполагает размещение во входном объеме ускорителя так называемой линзы Q-snout и реализации схемы “мягкого” ввода пучка (рис. 2б). В нашем случае подача напряжения от 5 до 90 кВ на электрод линзы Q-snout позволяет получить на выходе ускорителя слабосходящийся пучок с диаметром

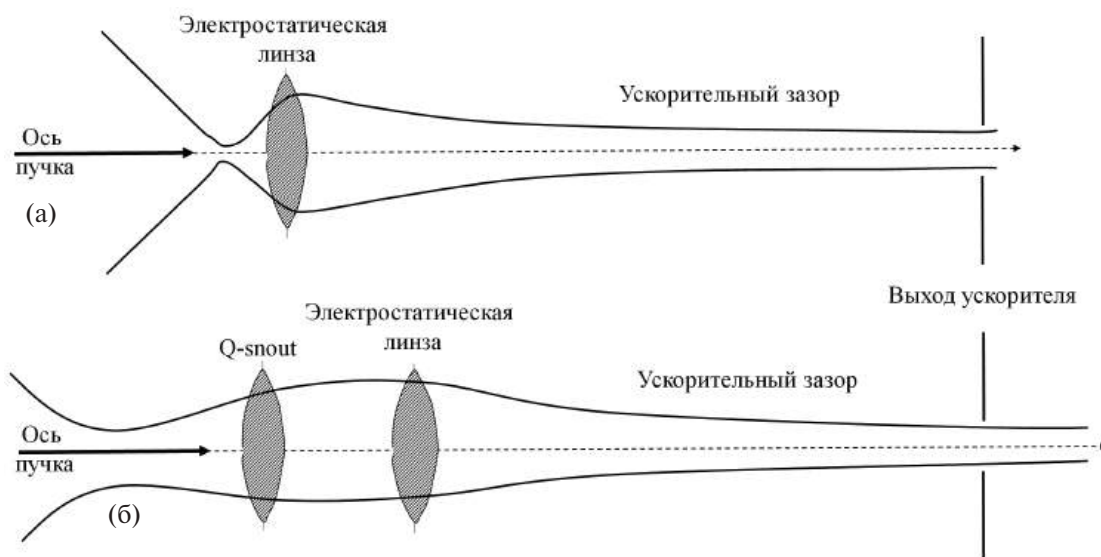


Рис. 2. Схемы ввода пучка в ускоритель: а – схема с жесткой фокусировкой, б – мягкий ввод.

около 10 мм. С использованием матричного формализма проанализирована новая оптическая схема. Проведено моделирование электрических полей и транспортировки пучка, получены его фазовый портрет и огибающие.

2. КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЗЫ

Конструкционная схема линзы Q-snout показана на рис. 3 и представляет собой два соосных цилиндрических электрода, разделенных зазором в 30 мм, общей протяженностью 175 мм. Согласующий электрод состоит из двух соединенных металлических цилиндров длиной 30 и 95 мм, диаметрами 30 и 60 мм соответственно. Перфорированная структура согласующего электрода с геометрическим коэффициентом прозрачности 0.75 обусловлена требованием вакуумной проводимости. На электроды подается управляющее напряжение U_i и U_m с независимых источников питания. Входной объем соединен с внешним баком ускорителя и вместе с охлаждаемой диафрагмой находится под земляным потенциалом. Заметим, что дифференциальная откачка во входном объеме ускорителя обеспечивает давление в 10^{-4} Па, что позволяет подавать напряжения на электроды линзы вплоть до 115 кВ. При помощи изолирующих керамических стержней линза устанавливается во входном объеме ускорителя вдоль оси пучка.

Таким образом, при подаче на электроды линзы управляющего напряжения:

- возникает линза иммерсионного типа с фокальными свойствами, определяемыми отношением U_i / U_m ;

- инжектируемый со стороны охлаждаемой диафрагмы пучок ионов фокусируется и увеличивает свою энергию на величину $e(U_i - U_m)$, что

в свою очередь уменьшает влияние на него входной электростатической линзы;

- ослабляется сила электростатической линзы за счет уменьшения градиента напряженности электрического поля ΔE между согласующим электродом и первым электродом ускорителя.

3. АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данном разделе мы формализуем задачу расчета модернизированной оптической системы, а далее, используя экспериментальные данные характеристик пучка, проведем численное моделирование транспортировки пучка. Целью расчета является получение величин управляющих напряжений U_m , U_i линзы Q-snout, которые позволят осуществить транспортировку пучка через ускоритель с минимальными потерями и обеспечат на выходе из ускорителя сходящийся протонный пучок с поперечным размером около 10 мм в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ. Экспериментальные данные измерений эмиттанса говорят о том, что на входе в ускоритель мы имеем пучок ионов с током 3 мА и поперечным размером 14 мм, угловым разбросом ± 50 мрад и нормализованным эмиттансом $\epsilon_{\text{norm}} = 0.20$ мм · мрад [3]. Мы будем использовать эти данные как для численных оценок, так и для моделирования.

За счет малого углового разброса расчет огибающей пучка можно проводить в параксиальном приближении, а слабое влияние пространственного заряда в области ускорения позволяет описать оптические свойства системы в терминах матрицы перехода для переменных $y(z)$ и $y'(z)$, где $y(z)$ мм – поперечный размер пучка в мм, а $y'(z)$ мрад – угол наклона огибающей к оси пучка. Начало отсчета мы поместим на

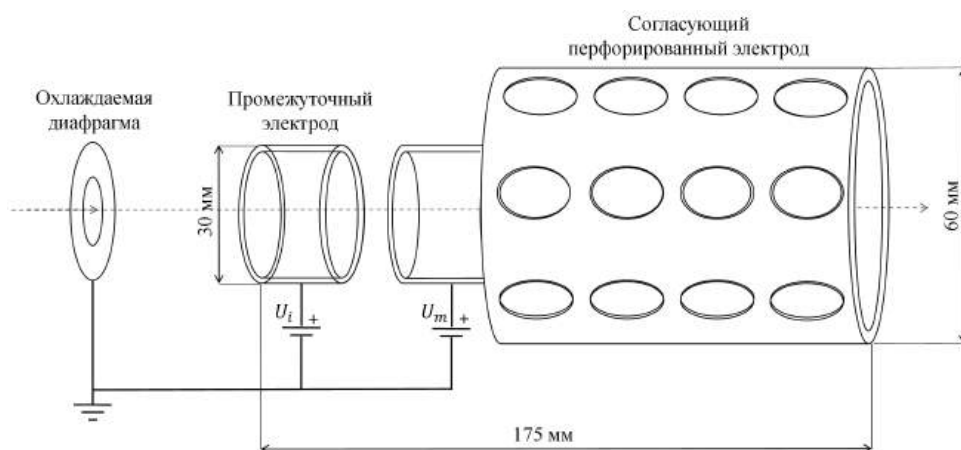


Рис. 3. Схема устройства линзы Q-snout.

место охлаждаемой диафрагмы (см. рис. 2б), тогда матричное уравнение, связывающее размеры и угол пучка на входе в ускоритель и на выходе, будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} y(z) \\ y'(z) \end{bmatrix} = M_G M_E M_F M_S M_M \begin{bmatrix} y_0(z) \\ y'_0(z) \end{bmatrix},$$

где M_F – матрица свободного промежутка, M_S – матрица линзы Q-spout, M_E – матрица входной электростатической линзы, M_G – матрица ускорительного промежутка. Для получения функциональной зависимости размера и угла наклона пучка от управляющего напряжения используем общеизвестные выражения фокусных расстояний апертурных и иммерсионных линз [4], а также упрощенную матрицу перехода для многоапертурного ускорительного промежутка. В развернутом виде уравнение принимает вид

$$\begin{bmatrix} y(z) \\ y'(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & A \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_E & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_E & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{bmatrix}.$$

Приведем далее выражения для компонент матриц:

$$\frac{1}{f_E} = \frac{e(E_1 - E_2)}{4(eU_m + \varepsilon_i)}$$

– фокусная сила входной электростатической линзы, где E_1 – напряженность поля на конце согласующего электрода, E_2 – напряженность поля между электродами ускорителя, U_i и U_m – напряжения на промежуточном и согласующем электродах, ε_i – энергия инжекции пучка;

$$\frac{1}{f_S} = \frac{(eU_i + \varepsilon_i)^2 + eU_m^2 - 2(U_m(eU_i + \varepsilon_i))}{4DU_m((eU_i + \varepsilon_i) + \sqrt{(eU_i + \varepsilon_i)eU_m})}$$

– фокусная сила двухэлектродной иммерсионной линзы, где D – зазор между электродами;

$$A = \frac{2b}{\left(1 + \sqrt{\frac{U_6}{U_1}}\right)}, \quad B = \sqrt{\frac{U_1}{U_6}},$$

L – расстояние между охлаждаемой диафрагмой и промежуточным электродом, b – размер ускорительного промежутка U_6 , U_1 – потенциалы первого и последнего ускоряющих электродов. Численный анализ уравнения дает оценку диапазона управляющего напряжения, необходимого для “мягкого” ввода пучка в ускоритель, $U_m = 30$ –80 кВ.

Для получения точных значений U_m , U_i проведено моделирование методом конечно-элементного анализа. Расчет состоял из двух этапов: сначала были получены трехмерные распределения электрических полей, потом рассчитаны огибающие и фазовые портреты пучка. Реальный размер и регулярный разлет пучка ионов задавались в соответствии с экспериментально полученными данными. На фазовой плоскости выбрано гауссово распределение плотности частиц [5].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графики расчета потенциала приведены на рис. 4. Согласующий электрод с поданным на него управляющим напряжением U_m контроли-

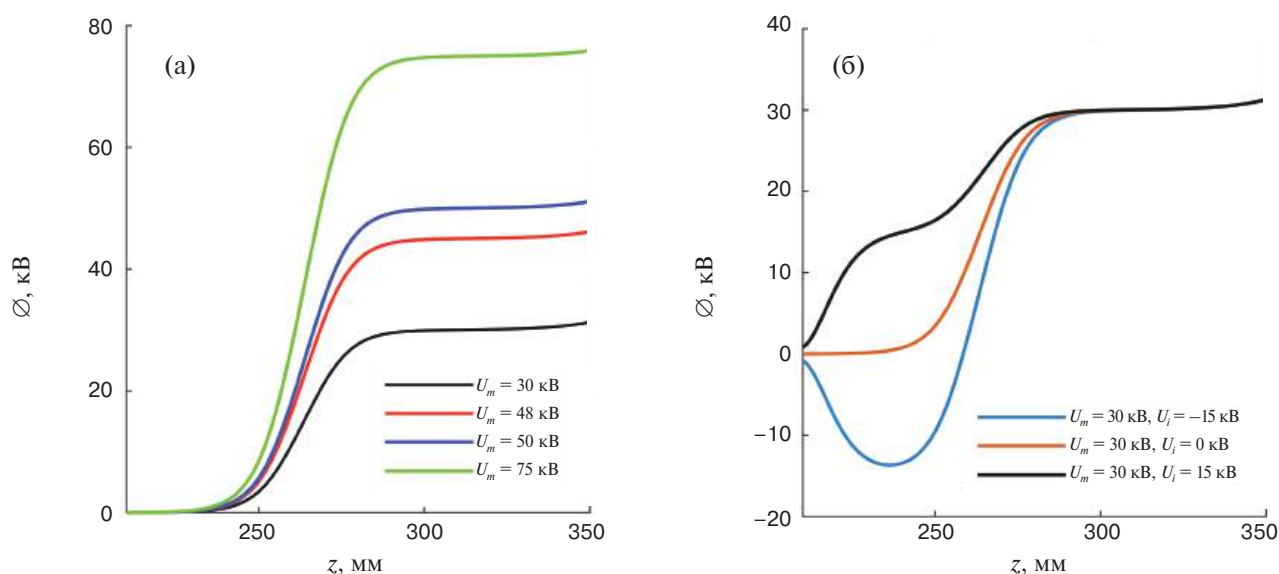


Рис. 4. Осевое распределение потенциала во входном объеме ускорителя при различных значениях U_i , U_m и высоковольтным напряжением 1 МВ: **а** – с нулевым потенциалом на промежуточном электроде, **б** – с подачей напряжения на промежуточный электрод.

рует силу входной линзы за счет снижения градиента напряженности поля в области 400 мм (рис. 4б). Роль промежуточного электрода заключается в независимом контроле фокусного расстояния линзы Q-snout.

Обозначим критерии выбора управляющих напряжений U_m , U_i для оптимального прохождения пучка:

- на протяжении всего ускорителя поперечный размер пучка не превышает 20 мм;
- реализуется режим “мягкого” ввода пучка, т.е. нет необходимости перефокусировать пучок на вход в ускоритель;
- на выходе из ускорителя пучок почти параллельный или слабосходящийся.

Рассмотрим огибающие пучка при работе ускорителя на энергии 200 кэВ. На рис. 5а видно, что при значениях $U_1 = 5–20$ кВ мы имеем плавно сходящийся пучок, который на выходе (1800 мм) имеет поперечные размеры 5–8 мм и угловой разброс ± 15 мрад, что отвечает приведенным выше критериям. При подаче напряжения на промежуточный электрод $U_i = -5$ кВ пучок дополнительно фокусируется, а при дальнейшем уменьшении U_i линза переходит в режим “жесткого” ввода, когда пучок перефокусируется на входе в ускоритель [5].

Перейдем к рассмотрению огибающей пучка при энергии 1.15 МэВ (рис. 5в). Поскольку сила входной линзы увеличилась, на согласо-

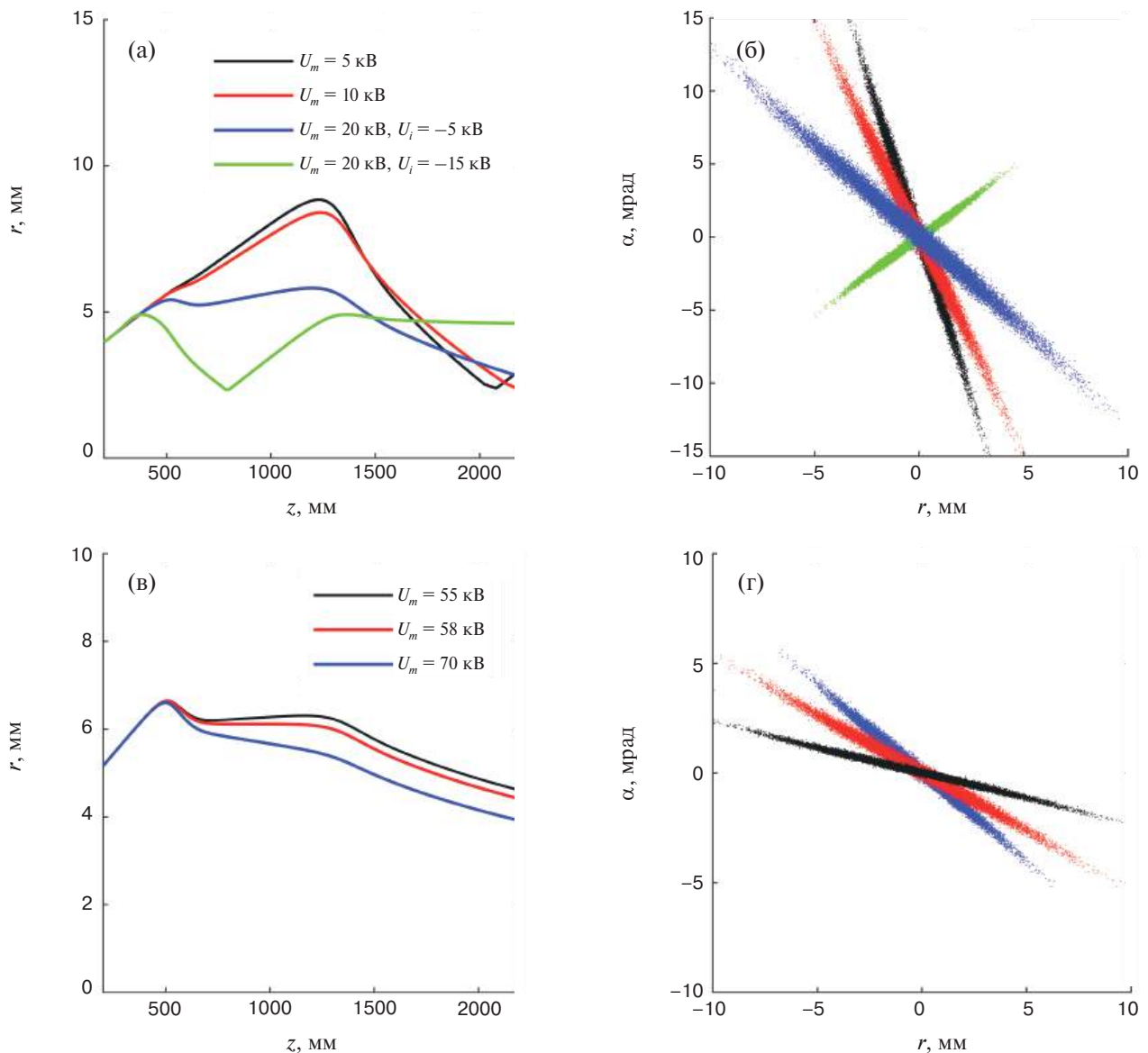


Рис. 5. Огибающие и фазовые портреты пучка протонов на выходе из ускорителя при энергиях 200 кэВ (а, б) и 1 МэВ (в, г).

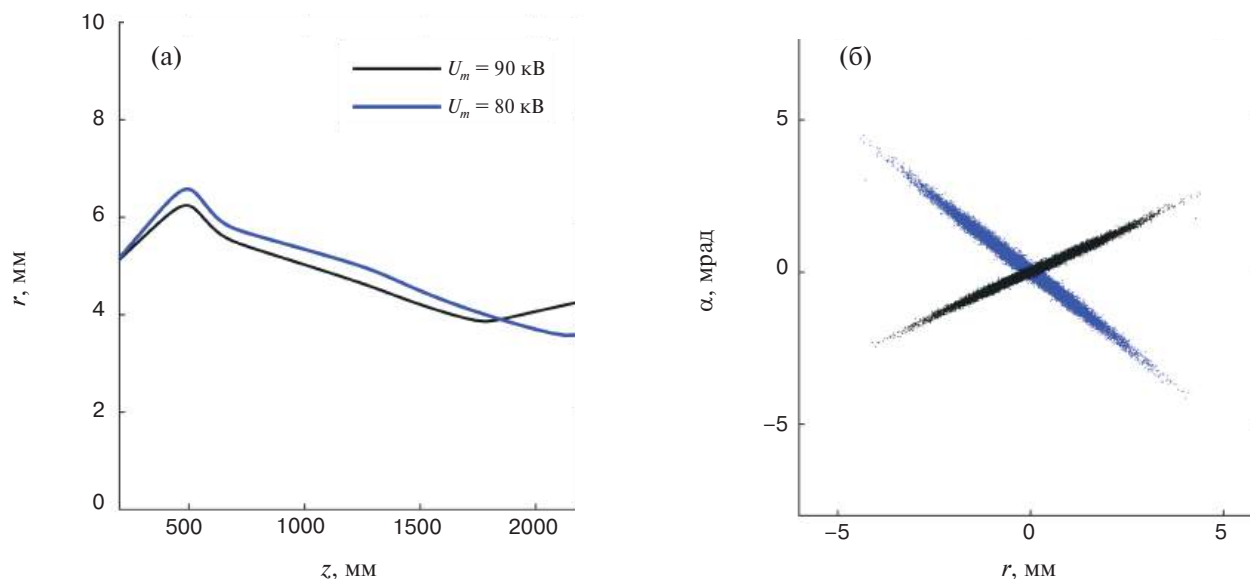


Рис. 6. Огибающие (а) и фазовые (б) портреты пучка протонов на выходе из ускорителя при энергии 2.15 МэВ.

ший электрод необходимо подать напряжение 50–60 кВ, тогда оптическая конфигурация пучка не изменится и на выходе мы получим пучок с размером 10 мм и угловым разбросом ± 10 мрад. Наконец, рассмотрим работу линзы при энергии пучка 2.3 МэВ, здесь сила входной линзы наибольшая, как видно на рис. 6а, все пучки являются сходящимися, а максимальный угловой разброс ± 2.5 мрад получается при подаче напряжения 90 кВ на согласующий электрод.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для применения тандемного электростатического ускорителя ВИТА в различных приложениях требуется обеспечить прохождение пучка через ускоритель в диапазоне энергий 0.2–2.3 МэВ. Особенностью многих электростатических ускорителей является сильная входная линза, естественным образом возникающая в месте соединения области, свободной от поля и ускорительного зазора. В текущей конфигурации установки для компенсации действия входной линзы используется схема с “жесткой” фокусировкой, когда соленоидальной магнитной линзой пучок ионов перефокусируется в область входной линзы. Поскольку сила входной линзы зависит от величины высоковольтного напряжения, данная схема имеет ряд недостатков [3]:

- необходимость точной подстройки фокусного расстояния при работе ускорителя на различных энергиях;

- большие сферические aberrации пучка;
- повышенная тепловая нагрузка на диафрагму первого ускоряющего электрода.

В данной работе предложено реализовать схему “мягкого” ввода пучка за счет установки во входной объем ускорителя двухэлектродной линзы Q-spout. В схеме с “мягкой” фокусировкой действие входной линзы ослабляется за счет плавного нарастания электрического поля на входе в ускоритель, причем градиент напряженности управляется напряжением на согласующем электроде U_i . При этом угол наклона огибающей пучка на входе в ускоритель близок к нулю. Достоинствами этой схемы по сравнению с “жесткой” фокусировкой является меньшая чувствительность коэффициента прохождения и выходных параметров пучка от угла сходимости пучка на входе в ускоритель. Анализ уравнений и расчет оптического тракта методом конечных элементов позволил определить диапазон значений напряжения на согласующем и на промежуточном электродах, необходимого для осуществления “мягкого” ввода пучка в диапазоне энергий 0.2–2.15 МэВ. Диапазон значений напряжений составил (10–90) кВ для U_m , и (–15–5) кВ для U_i . При этом во всех случаях на выходе из ускорителя удалось сформировать слабосходящийся или параллельный пучок. Максимальный угловой разброс ± 5 мрад и поперечный размер 5 мм получен при энергии ускорителя 2.3 МэВ. В остальных случаях средний размер пучка на выходе из ускорителя составил 4 мм, а угловой разброс ± 2.5 мрад.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-30005, <https://rscf.ru/project/19-72-30005/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касатов Д.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Таскаев С.Ю., Шудло И.М. // ПТЭ. 2020. № 5. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050158>
2. Elkind M.M. // Rev. Sci. Instrum. 1953. V. 24 (2). P. 129.
<https://doi.org/10.1063/1.1770640>
3. Бикчурина М.И., Быков Т.А., Колесников Я.А., Макаров А.Н., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Таскаев С.Ю., Шудло И.М. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 18.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040164>
4. Liebl H. Applied Charged Particle Optics, Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, p. 131.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-71925-0>
5. Быков Т.А., Касатов Д.А., Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Макаров А.Н., Остреинов Ю.М., Соколова Е.О., Таскаев С.Ю., Шудло И.М. // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 1. С. 105.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2021.01.50280.86-20>
6. Larson J.D. // Nuclear Instruments and Methods. 1974. V. 122. P. 53.
[https://doi.org/10.1016/0029-554X\(74\)90471-6](https://doi.org/10.1016/0029-554X(74)90471-6)