

## Моделирование динамики пучка в ускорителе RFQ для проекта DARIA\*

Г. Н. Кропачев<sup>1,2</sup>, Т. В. Кулевой<sup>1</sup>, А. Л. Ситников<sup>1</sup>, Е. Р. Хабибуллина<sup>1</sup>,  
С. В. Виноградов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Российская Федерация,  
117218, Москва, площадь Курчатова, 1

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Российская Федерация,  
141980, Московская обл., Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, Российская Федерация,  
141701, Московская обл., Долгопрудный, Институтский переулок, 9

**Для цитирования:** Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Хабибуллина Е. Р., Виноградов С. В. Моделирование динамики пучка в ускорителе RFQ для проекта DARIA // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2022. Т. 18. Вып. 4. С. 568–582.

<https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.411>

Проект DARIA (источник нейтронов, предназначенный для прикладных исследований и промышленного применения) направлен на разработку компактных генераторов нейтронов для университетов, научных центров и промышленности. В рамках проекта DARIA в Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт» разрабатывается импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 3 МэВ, рабочей частотой 162.5 МГц и током 100 мА. В статье описаны основные аспекты проектирования динамики пучка в RFQ, а именно: выбор параметров RFQ, оптимизация транспорта и трансмиссии пучка. Приведены результаты моделирования динамики пучка в RFQ.

*Ключевые слова:* динамика пучка, RFQ, транспорт, трансмиссия.

**1. Введение.** В рамках проекта DARIA [1] в Научно-исследовательском центре «Курчатовский институт» (ККТЭФ) разрабатывается импульсный линейный ускоритель с энергией 13 МэВ, резонансной частотой 162.5 МГц и током пучка 100 мА, предназначенный для создания компактного нейтронного генератора. Предполагается, что линейный ускоритель будет состоять из двух секций: ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и ускорителя с трубками дрейфа (DTL), между которыми будет осуществляться 6-мерное согласование пучка. В работе представлены результаты выбора параметров RFQ, а также численного моделирования динамики частиц.

Приведем основные требования к RFQ :

Рабочая частота, МГц.....	162.5
$A/Z$ .....	1
Ток инжекции, мА.....	100
Входной нормализованный эмиттанс, $\pi$ -мм·мрад.....	3.0
Энергия пучка, МэВ.....	3.0
Максимальная напряженность поля, кВ/см.....	250
Отношение акцептанса к эмиттансу.....	3

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

Транспорт, % .....	>95
Трансмиссия, % .....	>95

Рабочая резонансная частота 162.5 МГц определялась требованием компактности линейного ускорителя. Ток протонов 100 мА выбран исходя из условия создания заданного уровня нейтронного потока на мишени в реакции  $\text{Be}(p, n)$ . В качестве инжектора в данном проекте планируется использовать газодинамический источник ионов на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) [2]. Этот источник может обеспечивать требуемый ток с нормализованным эмиттансом не более  $2\pi$ -мм-мрад [3].

С учетом роста эмиттанса в канале согласования пучка с RFQ (low energy transport channel — LEVT) был выбран входной нормализованный эмиттанс  $\varepsilon_{\text{ninp}} = 3\pi$ -мм-мрад. Выходная энергия протонов 3 МэВ соответствует согласованному пучку для перезахвата в последующей секции DTL без потерь. Величина максимальной напряженности электрического поля на поверхности электрода  $E_{\text{smax}}$  выбирается из соотношения

$$E_{\text{smax}} = E_{Kp} \cdot Kp,$$

где  $E_{Kp}$  — критерий Килпатрика: напряженность поля на поверхности электрода, которая зависит от рабочей частоты и зазора между электродами [4];  $Kp$  — коэффициент Килпатрика, учитывающий режим работы ускорителя. Для импульсного режима, как правило,  $Kp = 1.8$ . Тогда для проекта DARIA  $E_{\text{smax}} = 250$  кВ/см.

Транспорт и трансмиссия — важные характеристики ускорителя. Транспорт — это отношение количества частиц, выходящих из ускорителя, к количеству инжектируемых частиц; трансмиссия — отношение количества ускоренных частиц на выходе линейного ускорителя к количеству инжектируемых частиц. Требования к RFQ: транспорт и трансмиссия — более 95 %, т. е. минимизация потерь частиц в RFQ. Цель состоит в том, чтобы свести к минимуму образование нейтронов и последующую активацию RFQ.

Как известно, нормализованный аксептанс канала — максимально возможный нормализованный эмиттанс согласованного пучка, транспортируемого в канале. Отношение нормализованного аксептанса  $V_k$  к нормализованному входному эмиттансу  $\varepsilon_{\text{ninp}}$  определяет возможную трансмиссию пучка в линейном ускорителе в зависимости от действия кулоновских сил. В соответствии с формулами И. М. Капчинского [5], отношение  $V_k/\varepsilon_{\text{ninp}} = 3$  является минимальным, при котором обеспечивается требуемое значение трансмиссии пучка. Поэтому нормализованный аксептанс определяется как  $V_k = 9\pi$ -мм-мрад.

**2. Выбор основных параметров RFQ.** В секции RFQ непрерывный пучок от источника преобразуется в отдельные сгустки. Таким образом, RFQ подготавливает пучок к его дальнейшему захвату на следующем участке в секции DTL.

При выборе параметров RFQ применялся метод, основанный на законах масштабирования в RFQ, который был описан в [6]. В статьях [7, 8] также использовался этот метод. Кроме того, принимались во внимание результаты оптимизации поперечного и продольного движений заряженных частиц в RFQ [9, 10]. Соответствующие результаты представлены на рис. 1, где показаны зависимости параметров RFQ:  $m$ ,  $\mu_t$ ,  $R_0$  от изменения значения нормализованного аксептанса  $V_k$ . Здесь  $m$  — отношение максимального расстояния от оси до электрода к минимальному расстоянию (модуляция электрода),  $\mu_t$  — набег фазы поперечных колебаний,  $R_0$  — среднее расстояние от оси до электродов (средний радиус).

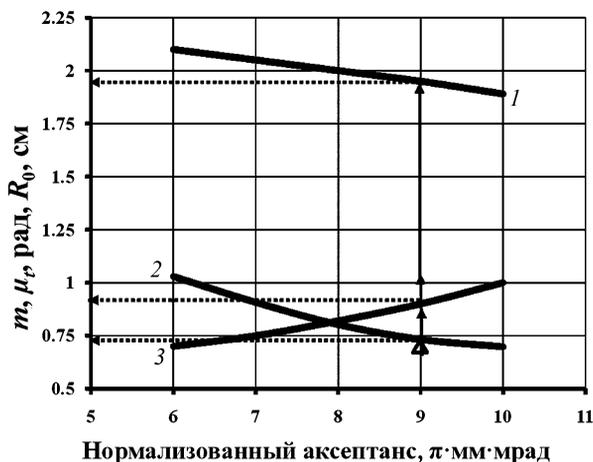


Рис. 1. Параметры RFQ:  $m$  (1),  $\mu_t$  (2),  $R_0$  (3) в зависимости от величины нормализованного аксептанса

Согласно рис. 1, для обеспечения требуемого аксептанса канала ( $V_k = 9 \pi \cdot \text{мм} \times \text{град}$ ) при заданной рабочей частоте 162.5 МГц набег фазы поперечных колебаний равен  $\mu_t \simeq 43^\circ$ , средний радиус  $R_0 = 9$  мм и максимальное значение модуляции  $m = 1.95$ . Тогда радиус апертуры канала определяется из соотношения

$$a = \frac{2}{m+1} R_0.$$

В работе [11] было показано, что фокусирующее поле электродов RFQ имеет наилучшую линейность при  $\rho \simeq 1.14R_0$ , а напряженность поля на поверхности электродов минимальна при  $\rho \simeq 0.7R_0$ , где  $\rho$  — радиус кривизны электрода,  $R_0$  — средний радиус канала. В качестве компромисса отношение радиуса кривизны электрода к среднему радиусу  $\rho/R_0$  остается постоянным на уровне 0.8 для уменьшения напряженности поля на поверхности. Основные расчетные параметры RFQ следующие:

Напряжение инъекции, кВ	60
Амплитуда напряжения между смежными электродами, кВ	173
Максимальный коэффициент модуляции электродов	1.95
Минимальный радиус апертуры, мм	6.1
Среднее расстояние от оси до электрода, мм	9
Радиус кривизны электрода, мм	7.2
Равновесная фаза, град	$-90 \div -40$
Нормализованный аксептанс канала, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{град}$	9

Параметры RFQ выбраны исходя из условия приблизительного равенства набегов фаз продольных  $\mu_z$  и поперечных  $\mu_t$  колебаний ионов на периоде фокусировки:

$$\mu_t = (1.05 \div 1.10)\mu_z.$$

Конструкция RFQ разделена на участки: 1) формирователя сгустков (Shaper), который начинается с раструба: поперечного согласователя (Radial Matcher Section — RMS); 2) группирующего участка с ускорением (Gentle Buncher); 3) регулярного ускорения (Accelerator). Секция RMS состоит из шести ячеек и позволяет уменьшить на-

клон огибающей пучка на входе RFQ. Таким образом, снижаются требования к фокусирующим элементам LEBT. На первом участке начинается слабая модуляция электродов для подготовки пучка к группировке. В этой части синхронная фаза находится в пределах  $-90^\circ \div -85^\circ$  и выполняется поперечное и продольное согласование пучка в RFQ. Затем второй участок группирует пучок с минимальной фазой около  $-40^\circ$ . Особенностью такой схемы является то, что нормализованный аксептанс канала определяется на стыке второго и третьего участков.

На участке регулярного ускорения средний радиус апертуры, модуляция электрода и синхронная фаза поддерживаются постоянными:  $R_0 = \text{const}$ ,  $a = \text{const}$ ,  $m = \text{const}$ ,  $\varphi = \text{const}$ . В этой части RFQ частицы получают максимальный прирост энергии.

Использование адиабатического изменения параметров RFQ вдоль группирующего участка приводит к постепенному уменьшению фазовой длины сепаратрисы. При этом с ростом скорости частиц сгустки раздвигаются, сохраняя неизменными геометрические размеры, а следовательно, и плотность пространственного заряда. Такой режим оптимален для получения большого значения аксептанса и высокого предельного тока [12, с. 130–143]. На рис. 2 показаны основные параметры RFQ в зависимости от длины: энергия  $W$ , равновесная фаза  $\varphi$ , фактор пролетного времени  $T$ , коэффициент модуляции  $m$ , средний радиус  $R_0$ , эффективность фокусировки  $\varkappa$  и нормализованный аксептанс  $V_k$  вдоль RFQ. Здесь эффективность фокусировки  $\varkappa$  и фактор пролетного времени  $T$  определяются по формулам, полученным для случая идеальных электродов в RFQ [11]:

$$T = \frac{\pi}{4} \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)},$$

$$\varkappa = 1 - \frac{4}{\pi} T I_0(ka),$$

где  $I_0$  — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка;  $k = 2\pi/\beta\lambda$  — волновое число.

*Энергия:* прирост энергии на метр на участке регулярного ускорения максимален и составляет 0.94 МэВ/м; на формирователе выходная энергия составляет 0.070 МэВ, выходная энергия группирователя — 0.7 МэВ.

*Равновесная фаза:* в начале формирователя она сохраняется постоянной и равной  $-90^\circ$ , что обеспечивает максимальный продольный захват, а затем увеличивается до  $-85^\circ$  таким образом, чтобы получить линейное уменьшение фазового размера сепаратрисы. На группирующем участке фаза возрастает до  $-40^\circ$ , обеспечивая адиабатическое группирование частиц. На участке регулярного ускорения фаза постоянная и равна  $-40^\circ$ , что обеспечивает максимальную скорость.

*Модуляция:* на участке RMS канал RFQ немодулирован ( $m = 1$ ); на формирователе он меняется незначительно из-за небольшого изменения равновесной фазы; на группирователе модуляция меняется с учетом адиабатичности параметров; на участке регулярного ускорения величина модуляции постоянна и равна 1.95 для получения максимальной энергии на выходе.

*Средний радиус:* на участке RMS средний радиус изменяется по синусоидальному закону, обеспечивая радиальное согласование пучка с RFQ, после раструба он постоянен и равен 9 мм.

*Фактор пролетного времени (эффективность ускорения):* на участке RMS при  $m = 1$  и без ускорения  $T = 0$ ; с увеличением модуляции  $T$  растет; на участке регулярного ускорения  $T = \text{const}$ .

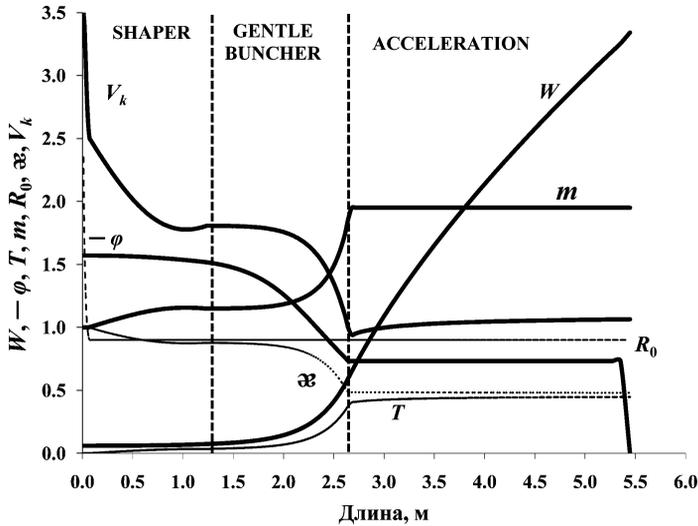


Рис. 2. Основные параметры RFQ вдоль всей структуры:  
 $W$  (МэВ),  $-\varphi$  (рад),  $T$ ,  $m$ ,  $R_0$  (см),  $\alpha$ ,  $V_k$  (п·мм·мрад)

*Эффективность фокусировки:* на участке RMS при отсутствии ускорения эффективность фокусировки имеет максимальное значение  $\alpha = 1$ ; с увеличением модуляции она уменьшается до 0.4 и сохраняется вдоль всего участка регулярного ускорения.

*Нормализованный аксептанс:* как было сказано выше, особенностью данной конструкции RFQ является то, что нормализованный аксептанс определяется на стыке участков группировки и регулярного ускорения частиц (рис. 2), и он равен  $V_k = 9\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .

**3. Численное моделирование динамики пучка в RFQ.** Численное моделирование динамики пучка в RFQ проводилось методом крупных частиц с использованием программ TraceWin [13] и LIDOS [14]. Графическое представление результатов моделирования осуществлялось в программе PlotWin [15]. Потенциал кулоновского поля рассчитывался на сетке  $32 \times 32 \times 32$  для одного периода модуляции в декартовой системе координат. Число шагов интегрирования уравнений движения по периоду модуляции было принято равным 100. Число частиц в полном пучке —  $10^5$ . На входе в RFQ использовались усеченное ( $\pm 3\sigma$ ) гауссово распределение в поперечном четырехмерном фазовом пространстве, а также равномерное распределение в продольном фазовом пространстве. Обычно в RFQ применяется четырехмерное согласование пучка (стандартное согласование). Опишем начальные согласованные условия на входе в RFQ для данного случая. Частицы равномерно распределены на продольной фазовой плоскости с фазовой длиной  $360^\circ$  и разбросом по энергии  $\pm 1\%$ . Эти условия типичны для большинства источников ионов. В радиальном направлении инжектируется аксиальносимметричный сходящийся пучок. На рис. 3 показан фазовый портрет согласованного пучка на входе RFQ.

Согласованный пучок способствует уменьшению роста эмиттанса. Согласование пучка с ускорителем характеризуется взаимным расположением эллипсов аксептанса канала и эмиттанса пучка. На рис. 4 приведены типичные эллипсы аксептанса канала (темный) и согласованный эмиттанс пучка (светлый) на входе RFQ. На нем видно, что эмиттанс инжектируемого пучка и аксептанс канала подобны, т. е. согла-

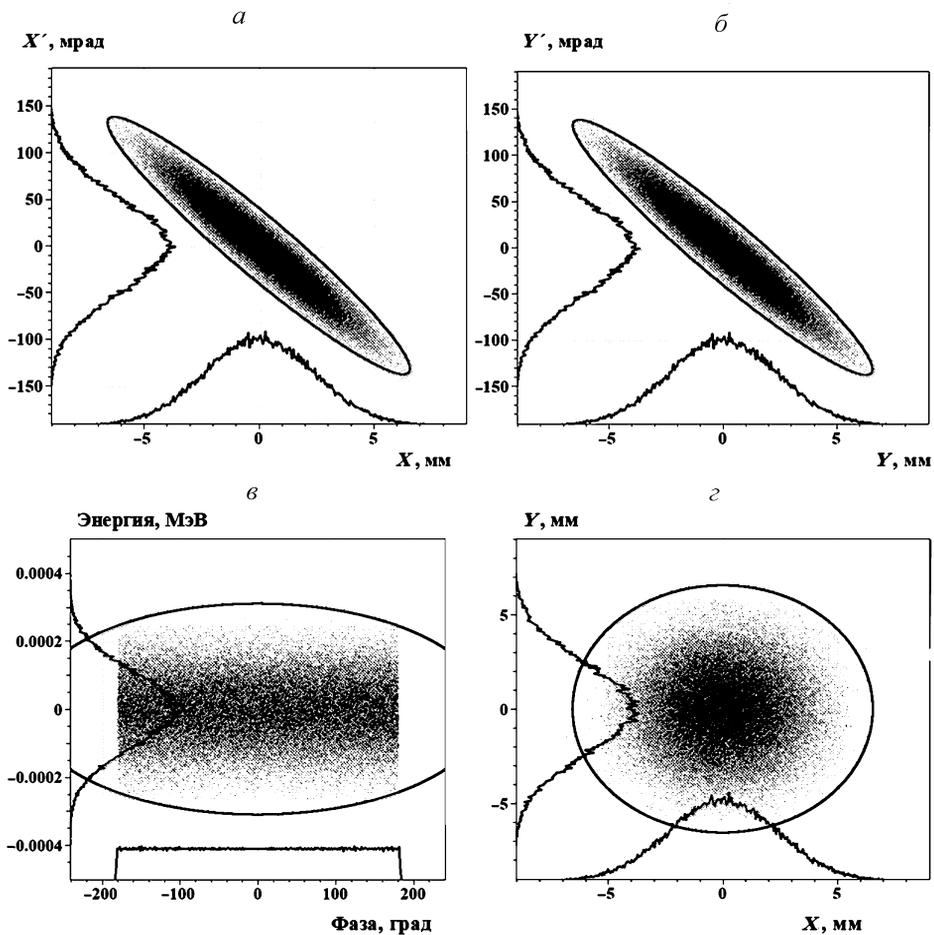


Рис. 3. Фазовый портрет пучка на входе RFQ (условие согласования)  
 а – плоскость  $X-X'$ ; б – плоскость  $Y-Y'$ ; в – плоскость Фаза – Энергия;  
 г – плоскость  $X-Y$ .

сованы. Численное моделирование показало, что отношение аксептанса к эмиттансу приблизительно равно 3, что соответствует требованиям RFQ (см. с. 567–568).

Согласно моделированию динамики пучка, длина всей структуры RFQ равна 5.446 м, формирователя сгустков – 1.224 м, группирователя – 1.454 м, участка регулярного ускорения – 2.766 м. Напряжение инжекции составляет 60 кВ, что позволяет обеспечить инжекцию требуемого тока при пониженном влиянии кулоновских сил.

На рис. 5 приведен профиль пучка RFQ для тока инжекции 100 мА. На нем видно, что из 100 000 инжектированных макрочастиц 99 694 достигли выхода ускорителя, т. е. транспорт составляет 99.7 %, что соответствует требованиям, сформулированным на с. 567–568.

Следует отметить, что:

- максимальный размер огибающих в поперечных плоскостях практически не увеличивается, что свидетельствует о хорошем согласовании пучка с каналом в радиальном направлении;
- наиболее плотная область пучка (его ядро) занимает около 0.75 площади апер-

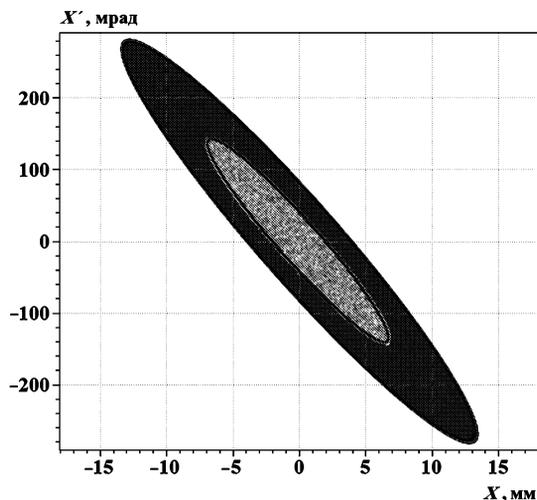


Рис. 4. Поперечное согласование нормализованного акцептанса  $V_k$  (темный) и нормализованного входного эмиттанса  $\varepsilon_{ninp}$  (светлый) на входе RFQ

**Макрочастицы : 99694 / 100000**

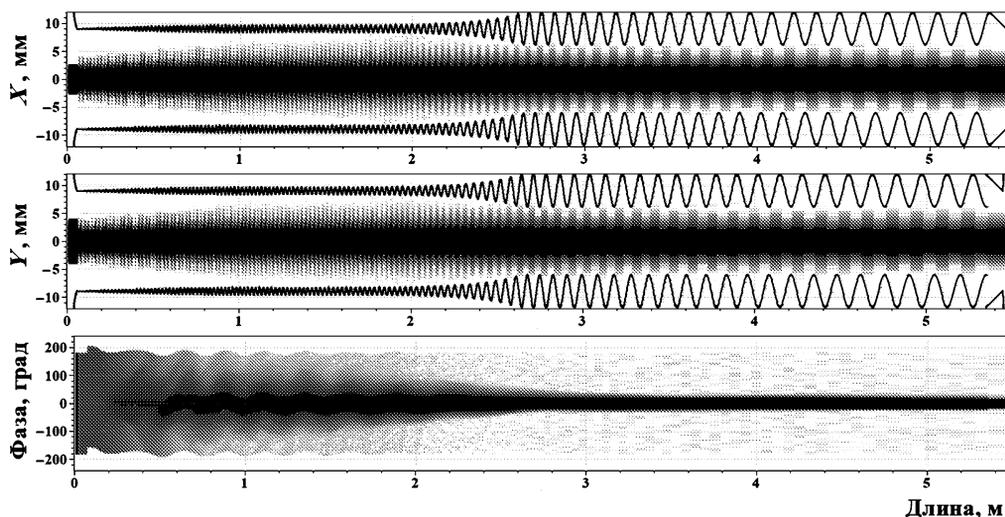


Рис. 5. Профиль пучка в RFQ:  $X$ ,  $Y$  и фаза по всей длине структуры

туры канала, где действие сил электрического поля, как правило, линейно. Это дает минимальный вклад в рост фазового объема;

— происходят постепенное уменьшение фазовой длины сгустка и его группировка вокруг равновесной частицы;

— когда на формирователе начинают образовываться сгустки (т. е. раздвигаются и ускоряются) под действием продольных кулоновских сил, возникают фазовые колебания центра пучка. По мере увеличения энергии частиц и расстояния между сгустками эти колебания затухают [12];

— из-за действия кулоновских сил небольшое количество частиц в группирователе не достигает энергии, близкой к энергии равновесной частицы.

На рис. 6 показан фазовый портрет на выходе RFQ для всех частиц, которые прошли всю структуру. Из него следует, что незначительная часть ионов (примерно 0.3 %) практически не ускоряется, т. е. имеет энергию, близкую к энергии инжекции. Позже эти частицы будут потеряны в магнитных линзах согласующего канала между RFQ и DTL.

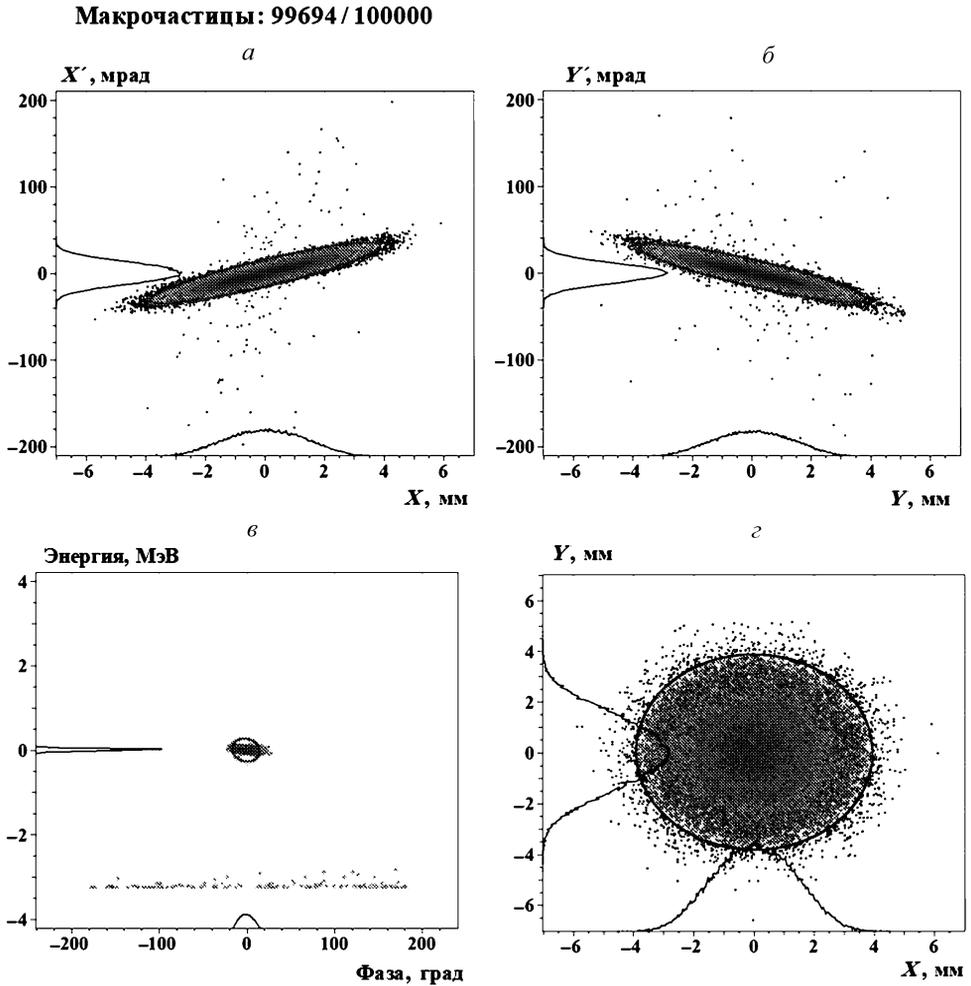
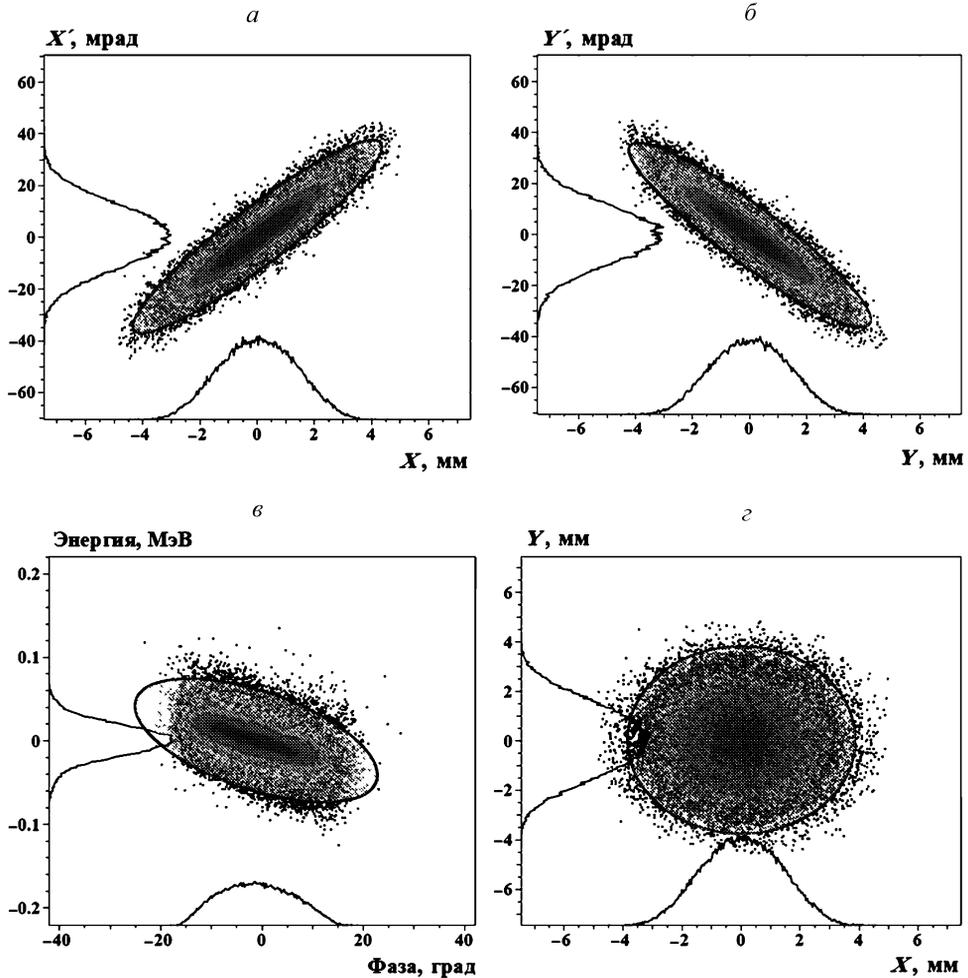


Рис. 6. Фазовый портрет пучка на выходе RFQ (общее количество частиц)  
*a* — плоскость  $X - X'$ ; *б* — плоскость  $Y - Y'$ ; *в* — плоскость Фаза — Энергия;  
*г* — плоскость  $X - Y$ .

На рис. 7 приведен фазовый портрет ускоренных частиц на выходе RFQ. Видно, что трансмиссия ускорителя RFQ составляет 99.5 %, что соответствует требованиям, сформулированным на с. 567–568. Отметим, что пучок хорошо сформирован по фазам:  $|\varphi| < 20^\circ$  и по энергиям:  $|W| < 0.1$  МэВ, что упрощает дальнейший захват пучка в секции DTL.

**Макрочастицы: 99500 / 99500**



*Рис. 7.* Фазовые портреты пучка на выходе RFQ (только ускоренные частицы)  
*a* — плоскость  $X - X'$ ; *б* — плоскость  $Y - Y'$ ; *в* — плоскость Фаза — Энергия;  
*г* — плоскость  $X - Y$ .

Распределение нормализованных среднеквадратичных поперечных эмиттансов вдоль длины RFQ иллюстрирует рис. 8. Наблюдается значительный рост эмиттанса на формирователе и группирующем участке с ускорением. Это объясняется связью между продольными и поперечными колебаниями частиц. Поскольку на вход RFQ поступает почти монохроматический пучок, возникает пульсация сгустка (действие продольной составляющей собственного поля пучка). Длина сгустка пульсирует на формирователе и группирувателе. Пульсация длины сгустка приводит к пульсациям плотности объемного заряда и, как следствие, к рассогласованию пучка и росту эмиттанса. Из этого рисунка видно, что рост среднеквадратичного эмиттанса составляет 27 %. Для распределения Гаусса, когда эмиттанс содержит 99 % пучка, рост эмиттанса достигает 65 %.

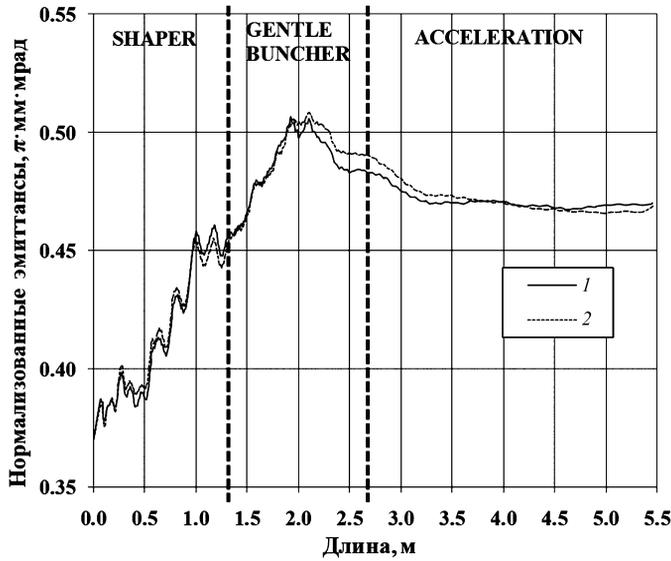


Рис. 8. Нормализованный поперечный эмиттанс пучка вдоль ускорителя RFQ  
 1 — плоскость  $X - X'$ ; 2 — плоскость  $Y - Y'$ .

Отметим, что выбор основных параметров RFQ был направлен на получение максимальных значений транспорта и трансмиссии при минимальном увеличении эмиттанта. Таким образом, после выбора параметров и последующего численного моделирования параметры RFQ можно при необходимости корректировать до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые результаты моделирования.

На группирующем участке с ускорением наблюдаются небольшие потери частиц. Это показано на рис. 9, который иллюстрирует распределение транспорта и трансмиссии вдоль RFQ. В ускоряющей части RFQ практически отсутствуют как потери (рис. 9), так и рост эмиттанта (см. рис. 8).

Выше были указаны величины транспорта и трансмиссии, которые характеризуют динамику пучка в RFQ. В этом случае  $\varepsilon_{ninp} = 3\pi$ -мм-мрад было выбрано в качестве входного значения нормализованного поперечного эмиттанта для 99 % пучка с током 100 мА. Однако при формировании пучка, выходящего из источника ионов, увеличение радиального эмиттанта может происходить из-за кулоновских сил и нелинейных полей фокусирующих элементов канала LEVT. Оценим возможности разработанного канала RFQ, когда нормализованный эмиттанс входного пучка будет выше расчетного при фиксированном токе инжекции 100 мА.

На рис. 10 видно, что даже при значительном увеличении расчетного значения входного эмиттанта в 2.5 раза транспорт канала снижается до 98 %, а трансмиссия — до 97 %. Это характеризует разработанный RFQ с нормализованным аксептансом канала  $V_k = 9\pi$ -мм-мрад, как устойчивый к значению входного эмиттанта в широком диапазоне его изменения.

Рассмотрим предельные возможности разработанного ускорителя RFQ по току ускоренных частиц на выходе структуры при фиксированном значении фазовой плотности (отношение входного тока к входному эмиттансу сохраняется). На рис. 11 показаны зависимости тока ускоренных частиц от тока инжекции. Как видно на нем, максимально достижимый ток составляет 300 мА. Однако увеличение тока ускорен-

ных частиц сопровождается уменьшением коэффициента захвата (рис. 11). Поскольку требуемый выходной ток составляет 100 мА, разработанный RFQ имеет трехкратный запас по максимальному выходному току пучка.

Приведем результаты моделирования динамики пучка в RFQ:

Рабочая частота, МГц .....	162.5
$A/Z$ .....	1
Ток инжекции, мА .....	100
Входная / выходная энергия, МэВ .....	0.06/3.3
Амплитуда напряжения между смежными электродами, кВ .....	173
Максимальная модуляция .....	1.95
Минимальный радиус апертуры, мм .....	6.1
Средний радиус, мм .....	9
Радиус кривизны электрода, мм .....	7.2
Максимальная напряженность поля на поверхности ( $Kp = 1.8$ ), кВ/см .....	250
Равновесная фаза, град .....	$-90 \div -40$
Входной нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .....	3.0
Нормализованный акцептанс канала, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .....	9
Отношение акцептанса к эмиттансу .....	3
Длина, м .....	5.446
Транспорт, % .....	99.7
Трансмиссия, % .....	99.7
Рост поперечного эмиттанса .....	1.65

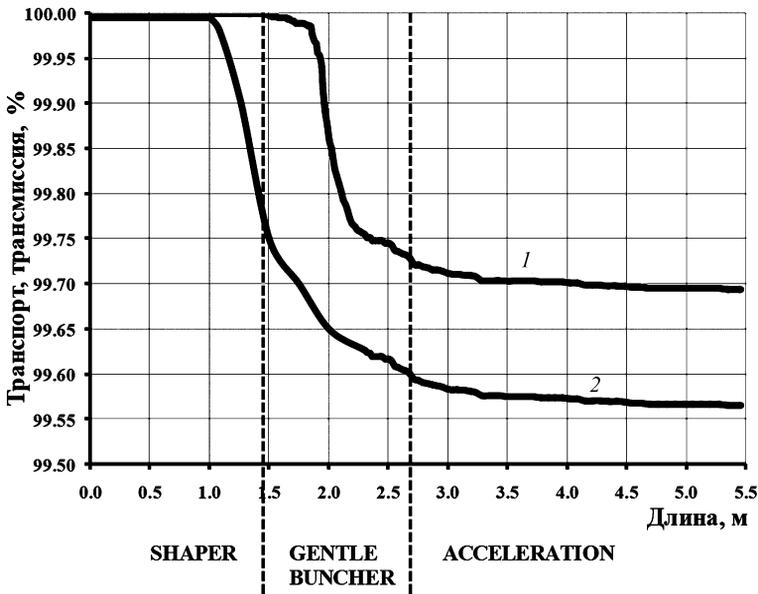


Рис. 9. Распределение величин транспорта (1) и трансмиссии (2) вдоль RFQ



Рис. 10. Транспорт (1) и трансмиссия ускорителя (2) в зависимости от величины нормализованного эмиттанса входного пучка (при постоянном входном токе 100 мА)

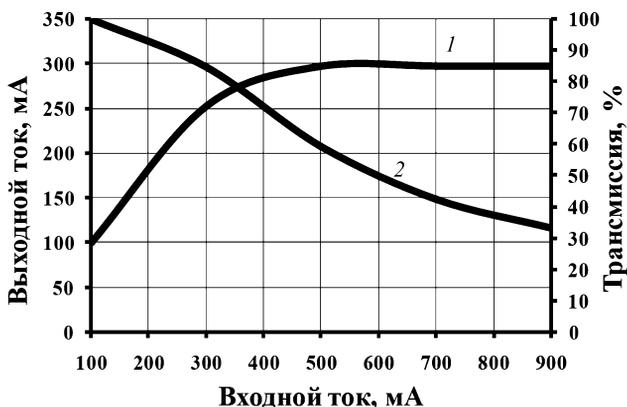


Рис. 11. Выходной ток (1) и трансмиссия ускорителя (2) в зависимости от входного тока пучка (при постоянной фазовой плотности)

**4. Заключение.** В рамках проекта DARIA был разработан импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 3.3 МэВ, резонансной частотой 162.5 МГц и током 100 мА (см. с. 567–568). При токе инжекции 100 мА и нормализованном эмиттансе  $3\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  транспорт в канале RFQ составляет 99.7 %, а трансмиссия — 99.5 %. При этом поперечный рост эмиттанса — 65 % (эмиттанс содержит 99 % пучка). Отметим, что значения транспорта не менее 98 % и трансмиссии не менее 97 % находятся в широком диапазоне изменения входного эмиттанса. При этом RFQ имеет тройной резерв по максимальному достижимому току, равному 300 мА. Таким образом, разработанный канал RFQ удовлетворяет приведенным в п. 1 (см. с. 577–578) требованиям.

## Литература

1. *Grigoriev S., Iashina E., Pavlov K.* Spin-echo small angle neutron scattering for a compact neutron source DARIA // Journal of Synch. Investigation. 2019. Vol. 13. P. 1132–1134. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060314>
2. *Skalyga V., Izotov I., Razin S.* High current proton beams production at simple mirror ion source 37 // Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85 (2). P. 02A702-1–02A702-3. <https://doi.org/10.1063/1.4825074>
3. *Барабин С. В., Кропачев Г. Н., Лукашин А. Ю., Кулевой Т. В., Выбин С. С., Голубев С. В., Изотов И. В., Киселева У. М., Скалыга В. А., Григорьев С. В., Коваленко Н. А.* Измерения эмиттанса газодинамического электронно-циклотронного резонансного источника ионов // Письма в Журн. техн. физики. 2021. Т. 47 (10). С. 7–10. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50964.18628>
4. *Kapchinsky I. M.* About approximations of Kilpatrick criterion // PTE. 1986. N 1. P. 33–35.
5. *Капчинский И. М.* Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966. 247 с.
6. *Wadlinger E. A.* Scaling laws for RFQ design procedures // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1985. Vol. 32 (5). P. 2596–2598. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4333992>
7. *Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A.* Proton linac for compact neutron source DARIA // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13 (6). P. 1126–1131. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
8. *Kulevoy T., Fatkullin R., Kozlov A., Kropachev G., Selesnev D., Semennikov A., Sitnikov A.* Compact multipurpose facility — BELA // Proceedings of 29<sup>th</sup> Linear Accelerator Conference. 2018. P. 349–351. <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-TUPO012>
9. *Balabanov M. Yu., Mizintseva M. A., Ovsyannikov D. A.* Beam dynamics optimization in a linear accelerator // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. Т. 14. Вып. 1. С. 4–13. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2018.101>
10. *Антропов И. В., Освятников А. Д.* Моделирование и оптимизация динамики частиц в ускорителе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2009. Вып. 4. С. 3–24.
11. *Балабин А. И., Липкин И. М., Угаров С. Б.* О выборе формы электродов в линейном ускорителе с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой // ВАНТ. Сер. Техника физического эксперимента. 1988. Т. 1 (36). С. 20–22.
12. *Капчинский И. М.* Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982. 241 с.
13. *Uriot D.* Status of TraceWin Code // Proceeding of IPAC. 2015. P. 92–94. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA008>
14. *Bondarev B. I., Durkin A. P., Murin B. P., Nikolaishvili G. T., Shlygin O. Yu.* LIDOS — unconventional helper for linac beam designing // AIP Conference Proceedings. 1993. Vol. 297. P. 377–384. <https://doi.org/10.1063/1.45334>
15. DACM Software. URL: <http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/> (дата обращения: 14.07.2022).

Статья поступила в редакцию 19 августа 2022 г.

Статья принята к печати 1 сентября 2022 г.

### Контактная информация:

*Кропачев Геннадий Николаевич* — канд. физ.-мат. наук; [kropachev@itep.ru](mailto:kropachev@itep.ru)

*Кулевой Тимур Вячеславович* — д-р техн. наук; [kulevoy@itep.ru](mailto:kulevoy@itep.ru)

*Ситников Алексей Леонидович* — канд. физ.-мат. наук; [aleksey.sitnikov@itep.ru](mailto:aleksey.sitnikov@itep.ru)

*Хабибуллина Екатерина Рамисовна* — [Ekaterina.Khabibullina@itep.ru](mailto:Ekaterina.Khabibullina@itep.ru)

*Виноградов Станислав Владиленович* — канд. физ.-мат. наук; [s.vinogradov@gmail.com](mailto:s.vinogradov@gmail.com)

## Beam dynamics of the project DARIA RFQ\*

G. N. Kropachev<sup>1,2</sup>, T. V. Kulevoy<sup>1</sup>, A. L. Sitnikov<sup>1</sup>, E. R. Khabibullina<sup>1</sup>, S. V. Vinogradov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Research Centre “Kurchatov Institute”, 1, pl. Kurchatova, Moscow, 117218, Russian Federation

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research, 6, ul. Joliot-Curie, Dubna, Moscow Region, 141980, Russian Federation

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, 9, Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation

**For citation:** Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sitnikov A. L., Khabibullina E. R., Vinogradov S. V. Beam dynamics of the project DARIA RFQ. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 568–582. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2022.411> (In Russian)

The project DARIA (neutron source dedicated to applied research and industrial applications) directed to the development of compact neutron generators for universities, scientific centers and industry. In framework of the DARIA project, the 3 MeV, 162.5 MHz and 100 mA pulse proton Radio Frequency Quadrupole (RFQ) is under development at National Research Centre “Kurchatov Institute”. In this article the main aspects of the beam dynamics design of this RFQ are described, namely the choice of RFQ parameters, the optimization of the transport and the transmission. Results of beam dynamic simulation in RFQ are presented.

*Keywords:* dynamic simulation, RFQ, transport, transmission.

## References

1. Grigoriev S., Iashina E., Pavlov K. Spin-echo small angle neutron scattering for a compact neutron source DARIA. *Journal of Synch. Investigation*, 2019, vol. 13, pp. 1132–1134. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060314>
2. Skalyga V., Izotov I., Razin S. High current proton beams production at simple mirror ion source 37. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85 (2), pp. 02A702-1–02A702-3. <https://doi.org/10.1063/1.4825074>
3. Barabin S. V., Kropachev G. N., Lukashin A. Yu., Kulevoy T. V., Vybin S. S., Golubev S. V., Izotov I. V., Kiseleva E. M., Skalyga V. A., Grigoriev S. V., Kovalenko N. A. Izmereniya emittansa gazodinamicheskogo elektronno-tsiklotronnogo rezonansnogo istochnika ionov [Measurements of the emittance of a gas-dynamic electron-cyclotron resonant ion source]. *Letters to the Journal of Technical Physics*, 2021, vol. 47 (10), pp. 7–10. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50964.18628> (In Russian)
4. Kapchinsky I. M. About approximations of Kilpatrick criterion. *PTE*, 1986, no. 1, pp. 33–35.
5. Kapchinsky I. M. *Dinamika chastits v lineynyykh rezonansnykh uskoritelyakh* [Particle dynamics in linear resonant accelerators]. Moscow, Atomizdat Publ., 1966, 247 p. (In Russian)
6. Wadlinger E. A. Scaling laws for RFQ design procedures. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1985, vol. 32 (5), pp. 2596–2598. <https://doi.org/10.1109/TNS.1985.4333992>
7. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. Proton linac for compact neutron source Daria. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2019, vol. 13 (6), pp. 1126–1131. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
8. Kulevoy T., Fatkullin R., Kozlov A., Kropachev G., Selesnev D., Semennikov A., Sitnikov A. Compact multipurpose facility — BELA. *Proceedings of 29<sup>th</sup> Linear Accelerator Conference*, 2018, pp. 349–351. <https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-TUPO012>
9. Balabanov M. Yu., Mizintseva M. A., Ovsyannikov D. A. Beam dynamics optimization in a linear accelerator. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2018, vol. 14, iss. 1, pp. 4–13. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2018.101>
10. Antropov I. V., Ovsyannikov A. D. Modelirovaniye i optimizatsiya dinamiki chastits v uskorigitele s prostranstvenno-odnorodnoy kvadrupol'noy fokusirovkoj [Simulation and optimization of particle dynamics in accelerator with spatially uniform quadrupole focusing]. *Vestnik of Saint Petersburg*

\* This work was financially supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in framework of Agreement N 075-15-2022-830 from May 27, 2022 (Prolongation of Agreement N 075-15-2021-1358 from October 12, 2021).

*University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2009, iss. 4, pp. 3–24. (In Russian)

11. Balabin A. I., Lipkin I. M., Ugarov S. B. O vybore formy elektrodov v lineynom uskoritele s prostranstvenno-odnorodnoy kvadrupol'noy fokusirovkoy [On choosing the electrodes from in linear accelerator with spatially uniform quadrupole focusing]. *VANT. Series Technique of physical experiment*, 1988, vol. 1 (36), pp. 20–22. (In Russian)

12. Kapchinsky I. M. *Teoriya lineynykh rezonansnykh uskoriteley* [Theory of linear resonance accelerators]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 241 p. (In Russian)

13. Uriot D. Status of TraceWin Code. *Proceeding of IPAC*, 2015, pp. 92–94.  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA008>

14. Bondarev B. I., Durkin A. P., Murin B. P., Nikolaishvili G. T., Shlygin O. Yu. LIDOS — unconventional helper for linac beam designing. *AIP Conference Proceedings*, 1993, vol. 297, pp. 377–384. <https://doi.org/10.1063/1.45334>

15. *DACM Software*. Available at: <http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/> (accessed: June 14, 2022).

Received: August 19, 2022.

Accepted: September 01, 2022.

#### A u t h o r s ' i n f o r m a t i o n :

*Gennady N. Kropachev* — PhD in Physics and Mathematics; [kropachev@itep.ru](mailto:kropachev@itep.ru)

*Timur V. Kulevoy* — Dr. Sci. in Technics; [kulevoy@itep.ru](mailto:kulevoy@itep.ru)

*Alexei L. Sitnikov* — PhD in Physics and Mathematics; [aleksey.sitnikov@itep.ru](mailto:aleksey.sitnikov@itep.ru)

*Ekaterina R. Khabibullina* — [Ekaterina.Khabibullina@itep.ru](mailto:Ekaterina.Khabibullina@itep.ru)

*Stanislav V. Vinogradov* — PhD in Physics and Mathematics; [s.vinogradov@gmail.com](mailto:s.vinogradov@gmail.com)