Научная статья

УДК 621.384.6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-20-30

# Динамика частиц в инжекторе для комплекса протонно-лучевой терапии «Луч-Протон»\*

## Геннадий Николаевич Кропачев<sup>1, 2</sup>, Тимур Вячеславович Кулевой<sup>1, 3</sup> Алексей Леонидович Ситников<sup>1</sup>, Екатерина Рамисовна Хабибуллина<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований Дубна, Московская область, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Москва, Россия

> <sup>1,2</sup>kropachev@itep.ru <sup>1,3</sup>kulevoy@itep.ru <sup>1</sup>aleksey.sitnikov@itep.ru <sup>1,3</sup>ekaterina.khabibullina@itep.ru

Аннотация

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» осуществляется проект «Луч-Протон» для создания центра протонно-лучевой терапии. В рамках этого проекта в НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ в качестве инжектора в протонный синхротрон разрабатывается импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 5 МэВ, рабочей частотой 162.5 МГц и током 30 мА. В данной статье описаны основные аспекты проектирования динамики пучка в RFQ, а именно: выбор параметров RFQ, оптимизация транспорта и трансмиссии ускоряющего канала, минимизация выходного эмиттанса пучка. Приведены результаты моделирования динамики пучка в RFQ.

Ключевые слова

RFQ, моделирование динамики пучка, тяжелые ионы

Для цитирования

Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Хабибуллина Е. Р. Динамика частиц в инжекторе для комплекса протонно-лучевой терапии «Луч-Протон» // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 4. С. 20–30. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-20-30

<sup>1</sup> Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Хабибуллина Е. Р., 2024

# Beam Dynamics Simuation in the Injector for the Proton-Radiation Therapy Complex «Luch-Proton»

Gennady N. Kropachev<sup>1, 2</sup>, Timur V. Kulevoy<sup>1, 3</sup>, Alexey L. Sitnikov<sup>1</sup> Ekaterina R. Khabibullina<sup>1,3</sup>

> <sup>1</sup>NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

> <sup>1,2</sup>kropachev@itep.ru <sup>1,3</sup>kulevoy@itep.ru <sup>1</sup>aleksey.sitnikov@itep.ru <sup>1,3</sup>ekaterina.khabibullina@itep.ru

#### Abstract

The "Luch-Proton" project of the proton beam therapy center is being created at the National Research Center «Kurchatov Institute». The pulsed proton accelerator RFQ with energy of 5 MeV, operating frequency of 162.5 MHz and current of 30 mA is being developed at the National Research Center "Kurchatov Institute" – KKTEF as an injector of the proton synchrotron. The main aspects of RFQ beam dynamics are described choosing RFQ parameters, optimizing the transport and transmission of the accelerating channel, minimizing the output beam emittance. The results of beam dynamics simulation in RFQ are presented.

#### Keywords

RFQ, beam dynamics simulation, heavy ions

For citation

Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sitnikov A. L., Khabibullina E. R. Beam dynamics simuation in the injector for the proton-radiation therapy complex «Luch-Proton». *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 20–30 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-20-30

#### Введение

В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается линейный ускоритель протонов для проекта «Луч-Протон», который предназначен для ускорения протонного пучка до энергии 5 МэВ с последующим инжектированием его в протонный синхротрон. В состав линейного ускорителя входит ионный источник, канал согласования (LEBT) протонного пучка между ионным источником и ускорителем с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) [1].

Основные требования к разрабатываемому инжектору сформулированы в табл. 1.

Таблица 1

## Основные требования к разрабатываемому инжектору

Table 1

*	
Параметр	Значение
Ускоряемые частицы	H+
Напряжение инжекции, кВ	45
Ток инжекции, мА	30
Нормализованный эмиттанс на входе RFQ (90 % частиц), π · мм · мрад	$\leq 0,75$
Выходная энергия частиц, МэВ	5,0
Разброс по импульсам на выходе RFQ (90 % частиц)	$\leq \pm 1,2 \%$
Нормализованный эмиттанс на выходе RFQ (90 % частиц), π · мм · мрад	≤ 1

### The main requirements of the injector

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 4 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 4

#### Выбор основных параметров RFQ

Рабочая резонансная частота 162,5 МГц обеспечивает достаточную компактность ускорителя. Повышение частоты приводит к дальнейшему увеличению компактности, однако при этом возникает ряд трудностей. Требуется более высокая точность изготовления, установки и юстировки структуры, усложняется настройка полей в ускоряющей структуре из-за невозможности использовать окна связи, усложняется система откачки. Поэтому выбрана резонансная частота 162,5 МГц.

Величина максимальной напряженности электрического поля на поверхности электрода  $E_{\text{smax}}$  выбирается из соотношения:

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

где  $E_{\rm Kp}$  – критерий Килпатрика – напряженность поля на поверхности электрода, которая зависит от рабочей частоты и зазора между электродами [2]; Кр – коэффициент Килпатрика, учитывающий режим работы ускорителя. Для импульсного режима, как правило, Кр = 1,8. Тогда для проекта «Луч-Протон»  $E_{\rm smax}$  = 250 кВ/см.

Транспорт и трансмиссия – важные характеристики ускорителя. Транспорт – это отношение общего количества частиц на выходе ускорителя к количеству инжектированных частиц. Трансмиссия – это отношение количества ускоренных частиц на выходе линейного ускорителя к количеству инжектированных частиц. Требования к RFQ: транспорт > 95 % и трансмиссия > 95 % обеспечивают незначительные потери частиц в RFQ. Цель состоит в том, чтобы свести к минимуму образование нейтронов и последующую активацию RFQ.

Нормализованный аксептанс канала  $V_k$  – максимально возможный нормализованный эмиттанс согласованного пучка, транспортируемого в канале без потерь [1]. Отношение нормализованного аксептанса  $V_k$  к нормализованному входному эмиттансу єпіпр определяет возможную трансмиссию пучка в линейном ускорителе в зависимости от действия кулоновских сил. Согласно формулам И. М. Капчинского [3], отношение  $V_k/\varepsilon_{ninp} = 3$  является минимальным значением, при котором обеспечивается требуемое значение трансмиссии пучка. С учетом основных требований к разрабатываемому инжектору (табл. 1) нормализованный эмиттанс на входе RFQ (для 90 % частиц) составляет 0,75  $\pi \cdot$  мм  $\cdot$  мрад. Нормализованный аксептанс для проекта «Луч-Протон» выбран равным 2,4  $\pi \cdot$  мм  $\cdot$  мрад.



*Puc. 1.* Зависимость параметров RFQ: m,  $\mu_t$ ,  $R_o$  от величины нормализованного аксептанса  $V_k$ *Fig. 1.* Dependence of RFQ parameters: m,  $\mu_t$ ,  $R_o$  on the value of normalized acceptance  $V_k$ 

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 4 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 4 При выборе параметров RFQ используется метод, основанный на законах подобия в RFQ, описанный в [4] и примененный в [5; 6]. Соответствующие результаты представлены на рис. 1, где показаны зависимости параметров RFQ, таких как m,  $\mu_t$ ,  $R_o$  от величины нормализованного аксептанса  $V_k$ . Здесь m – отношение максимального расстояния от оси до электрода к минимальному расстоянию (модуляция электрода);  $\mu_t$  – набег фазы поперечных колебаний;  $R_o$  – среднее расстояние от оси до электродов (средний радиус).

В соответствии с рис. 1 для обеспечения требуемого аксептанса канала  $V_k = 2,4 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  при заданной рабочей частоте 162,5 МГц поперечный набег фазы равен  $\mu_t = 51^\circ$ , средний радиус  $R_o = 6,5$  мм и максимальное значение модуляции m = 2,8. Тогда радиус апертуры канала определяется из соотношения:

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

Отношение радиуса кривизны электрода к среднему радиусу ( $\rho/R_0$ ) остается постоянным на уровне 0,8 для уменьшения напряженности поля на поверхности. Отметим, что в работе [7] было показано, что фокусирующее поле электродов RFQ имеет наилучшую линейность при  $\rho \cong 1,14 R_0$ , а напряженность поля на поверхности электродов минимальна при  $\rho \cong 0,7 R_0$ . Основные расчетные параметры RFQ приведены в табл. 2.

Основные параметры RFQ

Table 2

Таблица 2

Параметр	Значение
Частота ускоряющего поля, МГц	162,5
Ускоряемые частицы	$\mathrm{H}^{+}$
Ток инжекции, мА	30
Напряжение инжекции, кВ	45
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов	1,8 Kp
(по критерию Килпатрика)	
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, кВ/см	250
Энергия частиц, МэВ	0,045÷5,0
Нормализованный эмиттанс пучка, π·мм·мрад	0,75
Нормализованный аксептанс канала, <i>п</i> .мм.мрад	2,4
Отношение аксептанса канала к эмиттансу пучка	3
Синхронная фаза, град	-90÷-35
Напряжение между смежными электродами, кВ	129
Средний радиус, мм	6,5
Радиус электрода, мм	5,2
Максимальный коэффициент модуляции	2,8
Длина ускорителя, мм	7002

#### The main parameters of the RFQ

Параметры RFQ выбраны исходя из условия приблизительного равенства набегов фаз продольных µ<sub>2</sub> и поперечных µ<sub>1</sub> колебаний ионов на периоде фокусировки:

$$\mu_t = (1,05 \div 1,10)\mu_z.$$

Рабочая точка располагается вне полос параметрического резонанса между фазовыми и радиальными колебаниями частиц. При таком выборе параметров RFQ, с одной стороны, достигается достаточно низкая связь между степенями свободы. Кроме того, обеспечивается максимальный темп ускорения и высокий продольный захват.

Для характеристики эффективности фокусировки и ускорения используются следующие значения: эффективность фокусировки æ и фактор пролетного времени *T*, которые определяются по приведенным ниже формулам, полученным для случая идеальных электродов в RFQ [1]:

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

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

Из этих формул видно, что для немодулированного канала (m = 1) фактор пролетного времени T = 0, а эффективность фокусировки æ = 1, т. е. эффект фокусировки максимален. С увеличением глубины модуляции электродов эффективность ускорения увеличивается, но эффективность фокусировки снижается.

Как правило [5; 6], конструкция RFQ разделена на три части (рис. 2): согласующий участок (СУ), группирующий участок (ГУ) и участок регулярного ускорения (УРУ). В свою очередь, согласователь включает раструб и формирователь сгустков.

Раструб состоит из шести ячеек и позволяет уменьшить наклон огибающей пучка на входе RFQ. Таким образом, снижаются требования к фокусирующим элементам LEBT. В формирователе 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 с RFQ. Затем происходит группировка пучка с фазой  $-35^{\circ}$ . После участка группировки происходит ускорение пучка и продолжается до конца структуры. Особенностью такой схемы является то, что нормализованный аксептанс канала определяется на стыке группирующего и участка регулярного ускорения.

На участке регулярного ускорения величины среднего радиуса, радиуса апертуры, модуляции электродов и равновесной фазы сохраняются постоянными:  $R_0 = \text{const}$ ,  $\alpha = \text{const}$ , m = const,  $\phi = \text{const}$ . В этой части RFQ частицы получают максимальный прирост энергии.

Использовано адиабатическое изменение параметров вдоль группирующего участка за счет постепенного уменьшения длины фазы сепаратрисы. В этом случае по мере роста скорости частиц сгустки раздвигаются, сохраняя неизменные геометрические размеры, и, следовательно, плотность пространственного заряда. Этот режим оптимален для получения большой величины аксептанса и высокого значения предельного тока.

Длина всей структуры RFQ составляет 7002 мм, согласователя – 1101 мм, группирователя – 1132 мм, участка ускорения – 4769 мм. На рис. 2 показано распределение основных параметров RFQ в зависимости от длины: энергия (W), равновесная фаза ( $\phi$ ), фактор пролетного времени (T), коэффициент модуляции (m), средний радиус ( $R_0$ ), эффективность фокусировки (æ) и нормализованный аксептанс ( $V_k$ ).

Рассмотрим подробно каждый параметр.

Энергия. Прирост энергии на метр на ускоряющем участке составляет около 1,10 МэВ/м, где происходит основной прирост энергии частиц. На формирователе выходная энергия составляет 0,060 МэВ, выходная энергия группирователя – 0,97 МэВ.

Равновесная фаза. В начале формирователя равновесная фаза сохраняется постоянной и равной –90°, что обеспечивает максимальный продольный захват, а затем увеличивается



*Puc.* 2. Распределение параметров RFQ вдоль длины структуры:  $W(M_{2}B)$ ,  $-\phi(pag)$ , T, m,  $R_{0}$  (см), æ,  $V_{k}(\pi \cdot cm \cdot mpag)$ *Fig.* 2. Distribution of RFQ parameters along the length of the structure: W(MeV),  $-\phi(rad)$ , T, m,  $R_{0}$  (сm), æ,  $V_{k}(\pi \cdot cm \cdot mrad)$ .

до –85° таким образом, чтобы получить линейное уменьшение фазового размера сепаратрисы. На группирующем участке фаза увеличивается до –35°, обеспечивая адиабатическое группирование частиц. На ускоряющем участке фаза постоянная и равна –35°, что обеспечивает максимальную скорость.

*Модуляция*. В раструбе канал RFQ не модулирован (m = 1); на формирователе он меняется незначительно, из-за небольшого изменения равновесной фазы; на группирователе модуляция меняется с учетом адиабатичности параметров; при ускорении значение модуляции постоянно и равно 2,8 для получения максимальной энергии на выходе.

*Средний радиус.* В раструбе средний радиус изменяется по синусоидальному закону, обеспечивая радиальное согласование пучка с RFQ, после раструба он постоянен и равен 6,5 мм.

 $\Phi$ актор пролетного времени (эффективность ускорения). В раструбе, при m = 1 и без ускорения T = 0, с увеличением модуляции T увеличивается, при ускорении T =cost.

Эффективность фокусировки. В раструбе, при отсутствии ускорения, эффективность фокусировки имеет максимальное значение æ = 1; с увеличением модуляции она уменьшается до 0,226 и сохраняется вдоль всего участка ускоряющей секции.

*Нормализованный аксептанс.* Как было сказано выше, особенностью данной конструкции RFQ является то, что нормализованный аксептанс определяется на стыке участков группировки и ускорения частиц (см. рис. 1), и его величина равна  $V_k = 2,4 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад.}$ 

### Динамика пучка ионов в секции с RFQ методом крупных частиц

Численное моделирование динамики пучка в RFQ проводилось методом крупных частиц [8] с использованием программы TraceWin [9]. Графическое представление результатов моделирования осуществлялось в программе PlotWin<sup>1</sup>. Расчеты потенциала кулоновского поля проводились на сетке 32 × 32 × 32 для одного периода модуляции в декартовой системе координат. Число шагов интегрирования уравнений движения по периоду модуляции было принято

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> DACM Software. URL: http://irfu.cea.fr/Sacm/logiciels/

равным 100. Число макрочастиц в полном пучке – 10<sup>5</sup>. На входе в RFQ использовалось (± 2σ) гауссово распределение в поперечном четырехмерном фазовом пространстве, а также равномерное распределение в продольном фазовом пространстве. На фазовой плоскости эмиттанс определяется для 90 % пучка.

Для минимизации роста фазового объема в канале RFQ необходимо определить поперечные согласованные начальные условия на входе канала, что обычно выполняется по следующему алгоритму:

- определяется период структуры канала;
- находится периодическое решение для уравнения поперечного движения с учетом собственного поля пучка;
- полученное решение отображается на вход RFQ.

Как правило, при реализации RFQ используется 4-мерное согласование пучка с каналом, которое называется стандартным согласованием. При стандартном согласовании начальные условия на входе RFQ имеют следующий вид (рис. 3). Частицы на продольной фазовой плоскости распределяются равномерно на отрезке  $\beta\lambda$  с разбросом по импульсам  $\pm$  0,5 %, что является характерным значением для большинства источников ионов. В поперечном направлении на вход подается практически аксиально-симметричный сходящийся пучок.

Согласованный пучок способствует уменьшению роста эмиттанса. Согласование пучка с ускорителем характеризуется взаимным расположением эллипсов нормализованного аксептанса канала и нормализованного эмиттанса пучка. Численное моделирование показало, что отношение аксептанса к эмиттансу приблизительно равно 3, что соответствует требованиям RFQ (см. табл. 2).

На рис. 3 приведены огибающие пучка в RFQ. Из данного рисунка видно, что максимумы огибающих пучка практически не возрастают, т. е. пучок хорошо согласован с ускорителем.



*Puc. 3.* Огибающие пучка в RFQ *Fig. 3.* Beam envelopes in RFQ

Согласно моделированию, из 100 000 инжектируемых макрочастиц 99 676 достигли выхода ускорителя, т. е. величина транспорта составляет 99,7 %, что соответствует требованиям к ускорителю.

Анализируя рис. 3, можно отметить:

 максимальный размер огибающих пучка в поперечных плоскостях практически не увеличивается. Это свидетельствует о хорошем согласовании пучка с каналом в радиальном направлении;

- наиболее плотная область пучка (его ядро) занимает около 0,75 площади апертуры канала, где действие сил электрического поля, как правило, линейно. Это дает минимальный вклад в рост фазового объема;
- происходит постепенное уменьшение фазовой длины сгустка и его группировка вокруг равновесной частицы;
- в отсутствии продольного согласования пучка с каналом происходит колебание центра сгустка около синхронной частицы. По мере увеличения энергии частиц сгусток группируется около синхронной частицы, центр сгустка приближается к синхронной частице и происходит затухание колебаний.
- заметен некоторый фазовый скачок в момент разделения непрерывного пучка на сгустки. В этот момент расстояние между сгустками минимально, а действие продольных кулоновских сил между сгустками максимально;
- небольшое количество частиц в группирователе не достигает энергии, близкой к энергии равновесной частицы. Это можно объяснить отсутствием продольного согласования пучка с RFQ.

По результатам моделирования определено, что величина транспорта составляет 99,7 %, при этом незначительная часть ионов ( $\approx 0,3$  %) практически не ускоряется, т. е. имеет энергию, близкую к энергии инжекции. Позже эти частицы будут потеряны в магнитных линзах канала транспортировки между RFQ и протонным синхротроном. Трансмиссия ускорителя составляет 99,3 %, а разброс по импульсам на выходе RFQ для 90 % частиц не превышает  $\Delta p/p = \pm 0,6$  %.

Распределение нормализованных среднеквадратичных поперечных эмиттансов вдоль длины RFQ иллюстрирует рис. 4. Наблюдается рост эмиттанса на согласующем и группирующем участке. 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 группирователе. Пульсация длины сгустка приводит к пульсациям плотности объемного заряда и, как следствие, к рассогласованию пучка с ускорителем и росту эмиттанса. Из этого рисунка видно, что рост среднеквадратичного эмиттанса составляет 24 %. Как показали расчеты для распределения Гаусса, когда эмиттанс содержит 90 % пучка, рост эмиттанса составляет 20 %. Отметим, что на участке регулярного ускорения практически отсутствует рост эмиттанса.



*Puc. 4.* Распределение нормализованных среднеквадратичных поперечных эмиттансов вдоль длины RFQ *Fig. 4.* Distribution of normalized root-mean-square transverse emittances along the RFQ length



*Рис.* 5. Зависимость транспорта и трансмиссии RFQ от величины входного эмиттанса пучка
*Fig.* 5. Dependence of RFQ transport and transmission for proposals on the size of the input beam emittance

Выше были найдены значения транспорта (99,7 %) и трансмиссии (99,3 %), которые характеризуют динамику пучка в RFQ. В этом случае величина 0,75  $\pi \cdot cM \cdot mpad$  была выбрана в качестве входного значения нормализованного поперечного эмиттанса для 90 % пучка с током 30 мА. Однако при формировании пучка, выходящего из источника ионов, увеличение поперечного эмиттанса может происходить из-за кулоновских сил и нелинейных полей фокусирующих элементов канала LEBT. Оценим возможности разработанного канала RFQ, когда нормализованный эмиттанс входного пучка будет выше расчетного значения при фиксированном токе инжекции 30 мА. На рис. 5 видно, что даже при значительном увеличении расчетного значения входного эмиттанса (в 3 раза) транспорт этого канала, а также трансмиссия превышают 95 %. Это характеризует разработанный RFQ как устойчивый к величине входного эмиттанса в широком диапазоне его изменения.

## Заключение

В рамках проекта «Луч-Протон» разработан импульсный протонный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) с энергией 5 МэВ, резонансной частотой 162,5 МГц и током 30 мА (см. табл. 2). При токе инжекции 30 мА и нормализованном эмиттансе 0,75  $\pi$ ·мм·мрад транспорт в канале RFQ составляет 99,7 %, а трансмиссия – 99,3 %. При этом разброс по импульсам  $\Delta p/p$  на выходе RFQ для 90 % частиц не превышает ±0,6 %. Рост поперечного эмиттанса составляет 1,2 (эмиттанс содержит 90 % пучка). Отметим, что значение транспорта и трансмиссии не меньше 95 % в широком диапазоне изменения входного эмиттанса. Таким образом, разработанный канал RFQ удовлетворяет основным требованиям, представленным в табл. 1.

- 1. **Капчинский И. М.** Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.
- 2. Kapchinsky I. M. About approximations of Kilpatrick criterion // PTE. 1986. № 1. P. 33–35.
- 3. Kapchinsky I. M. Particle dynamics in linear resonance accelerators. Moscow, 1966. 247 p.
- 4. Wadlinger E. A. Scaling Laws for RFQ Design Procedures // Proc. PAC. Vancouver, British Columbia, May 13–16, 1985. P. 2596–2598.
- Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. The Proton Linac for Compact Neutron Source Daria // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2019. Vol. 13, no. 6. P. 1126–1131. DOI: 10.1134/S1027451019060399
- 6. **Kulevoy T. et al.** Compact multipurpose facility BELA // Proc. 29 the Linear Accelerator Conf. (Beijing, China, Sep. 2018), p. 349. https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-TUPO012.
- 7. 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. Вып. 1(36). М., 1988. С. 20–22.
- 8. Рошаль А. С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
- 9. Uriot D., Pichoff N. Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp 92–94.

### References

- 1. **Kapchinsky I. M.** Theory of linear resonant accelerators. Moscow, Energoizdat publ., 1982, pp. 130–144.
- 2. Kapchinsky I. M. About approximations of Kilpatrick criterion. *PTE*, 1986, № 1, pp. 33–35.
- 3. Kapchinsky I. M. Particle dynamics in linear resonance accelerators, M., 1966, pp. 247.
- 4. Wadlinger E. A. Scaling Laws for RFQ Design Procedures. *Proc. PAC*, 1985, Vancouver, British Columbia, May 13–16, 1985, pp. 2596–2598.
- Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. The Proton Linac for Compact Neutron Source Daria, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 1126–1131. DOI: 10.1134/S1027451019060399
- 6. **Kulevoy T. et al.** Compact multipurpose facility BELA. In Proc. 29 the Linear Accelerator Conf. (Beijing, China, Sep. 2018), p. 349. https://doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-TUPO012
- 7. Balabin A. I., Lipkin I. M., Ugarov S. B. On the choice of the shape of electrodes in a linear accelerator with spatially uniform quadrupole focusing. *VANT. Ser.: Technique of physical experiment*, Moscow, 1988, iss. 1(36), pp. 20–22.
- 8. Roshal A. S. Modeling of charged beams. Moscow, Atomizdat publ., 1979.
- 9. Uriot D., Pichoff N. Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015. Richmond, VA, USA, pp. 92–94.

## Сведения об авторах

- Кропачев Геннадий Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
- **Кулевой Тимур Вячеславович,** доктор технических наук, заместитель руководителя ККТЭФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам
- Ситников Алексей Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

## Хабибуллина Екатерина Рамисовна, младший научный сотрудник

## Information about the Authors

Gennady N. Kropachev, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Leading Researcher

**Timur V. Kulevoy**, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Head of KCTEP for applied scientific research and experimental installations

Alexey L. Sitnikov, Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Senior Researcher

Ekaterina R. Khabibullina, Junior Researcher

Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 05.03.2024; принята к публикации 06.09.2024 The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 05.03.2024;

accepted for publication 06.09.2024

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 4 Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 4