

Научная статья

УДК 621.384

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-63-70

Моделирование и измерение эмиттанса пучков ионов углерода в канале радиобиологических исследований на ускорительном комплексе У-70*

Александр Васильевич Максимов¹, Фёдор Николаевич Новоскольцев²
Роман Юрьевич Синюков³, Андрей Антонович Янович⁴

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова
НИЦ «Курчатовский институт»
Протвино, Россия

¹Alexander.Maximov@ihep.ru

²Fedor.Novoskoltsev@ihep.ru

³Roman.Sinyukov@ihep.ru

⁴yanovich@ihep.ru

Аннотация

Описана методика определения эмиттанса пучков ионов углерода путем измерения их поперечных размеров в конце воздушного промежутка канала. Рассмотрено обратное преобразование фазовых эллипсов с учетом многократного кулоновского рассеяния частиц и наличия дисперсии в пучке ионов углерода. Приведены значения бетатронного эмиттанса перед первой квадрупольной линзой, которые сравниваются с данными, полученными прямым расчетом, начиная от внутренней мишени. Обсуждаются неточности в расчетных и измеренных значениях эмиттанса. Моделирование и измерение проводились при энергиях пучков перед мишенью 200, 300 и 400 МэВ/нуклон.

Ключевые слова

каналы заряженных частиц, ионы углерода, измерение эмиттанса пучка, радиобиологические исследования

Для цитирования

Максимов А. В., Новоскольцев Ф. Н., Синюков Р. Ю., Янович А. А. Моделирование и измерение эмиттанса пучков ионов углерода в канале радиобиологических исследований на ускорительном комплексе У-70 // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 63–70. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-63-70

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Simulation and Measurement of Carbon Ion Beam Emittance in the Channel of Radiobiological Research at the Accelerator Complex U-70

Alexandre V. Maksimov¹, Fyodor N. Novoskoltsev²
Roman Yu. Sinyukov³, Andrey A. Yanovich⁴

NRC “Kurchatov Institute” IHEP
Protvino, Russian Federation

¹Alexander.Maksimov@ihep.ru

²Fedor.Novoskoltsev@ihep.ru

³Roman.Sinyukov@ihep.ru

⁴yanovich@ihep.ru

Abstract

The technique for determining the emittance of carbon ion beams by measuring their transverse dimensions at the end of the air gap of the channel is described. The inverse transformation of phase ellipses is considered, taking into account multiple Coulomb scattering of particles and the presence of dispersion in the carbon ion beam. The values of betatron emittance before the first quadrupole lens are given and compared with data obtained by direct calculation starting from the inner target. Inaccuracies in the calculated and measured emittance values are discussed. Simulations and measurements were performed at beam energies of 200, 300, and 400 MeV/nucleon in front of the target.

Keywords

charged particles beamlines, carbon ions, beam emittance measurement, radiobiological studies

For citation

Maksimov A. V., Novoskoltsev F. N., Sinyukov R. Yu., Yanovich A. A. Simulation and measurement of carbon ion beam emittance in the channel of radiobiological research at the accelerator complex U-70. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 63–70 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-63-70

Структура канала

Канал транспортировки пучков ионов углерода от ускорителя U-70 в зону радиобиологических исследований [1] функционально включает в себя следующие группы магнитооптических элементов (рис. 1):

- септум-магнит и три дипольных магнита, отклоняющие пучок на угол $\sim 32^\circ$;
- квартет и триплет квадрупольных линз, формирующие в зоне радиобиологических исследований пучок с требуемыми линейными и угловыми размерами;
- вобблер-магниты, установленные сразу после последней линзы и формирующие поперечное равномерное дозовое поле в зоне радиобиологических исследований.

Внутренняя мишень расположена в 28 прямолинейном промежутке ускорителя, септум-магнит установлен в 34 промежутке. Отклоняющие магниты и квартет квадрупольных линз расположены в кольцевом зале ускорителя, в то время как триплет линз и вобблер-магниты размещены за биологической защитой ускорителя. Зона радиобиологических исследований отделена от канала бетонной стенкой толщиной 1 м.

Для установки детектора обратной связи по интенсивности между второй и третьей квадрупольной линзой имеется технологический разрыв вакуумного ионопровода, эквивалентный по материалу ~ 700 мкм Mylar ($C_5H_4C_2$). Вакуум заканчивается на последней квадрупольной линзе (перегородка из Mylar имеет толщину 200 мкм), после которой пучок ионов углерода транспортируется исключительно по воздуху.

Для определения и оптимизации режимов магнитооптических элементов канала необходимо знать пространственные характеристики пучка перед первой квадрупольной линзой, т. е. двумерные распределения частиц в фазовых плоскостях $\{xx'\}$ и $\{yy'\}$. Эти распределения мож-

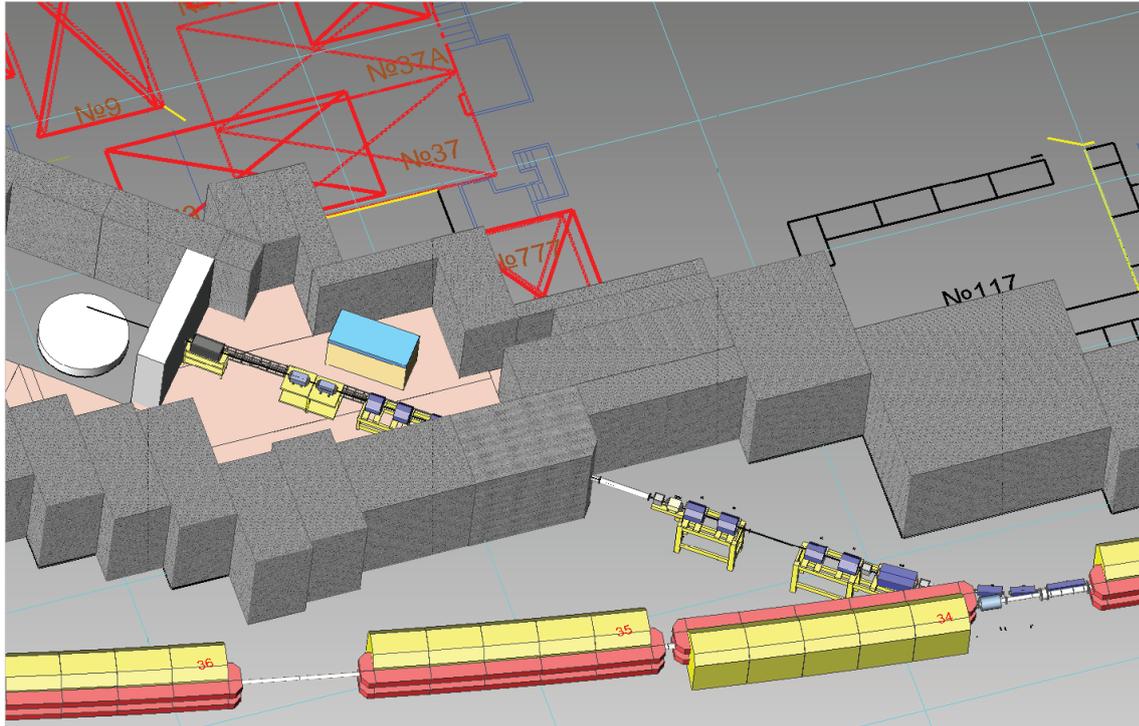


Рис. 1. Взаимное расположение ускорителя У-70 и канала радиобиологических исследований в экспериментальном зале 1БВ

Fig. 1. The relative position of the U-70 accelerator and the radiobiological research channel in the experimental hall 1BV

но получить как прямым расчетом, начиная от внутренней мишени, так и после измерения эмиттанса пучка в последнем воздушном свободном промежутке и преобразовании фазовых параметров пучка в начало канала.

Преобразование параметров фазового эллипса

При нахождении эмиттанса будем исходить из предположения, что пучок частиц в фазовых плоскостях имеет эллиптическую форму. Во многих случаях это допущение вполне оправдано, в противном случае определяется эффективный эмиттанс.

Уравнение фазового эллипса Флоке $\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon$, где ε – эмиттанс пучка, имеет коэффициенты квадратичной формы, которые напрямую не дают значения линейной и угловой огибающих пучка.

Значение огибающих пучка непосредственно можно получить при рассмотрении σ -матрицы, коэффициенты которой связаны с параметрами эллипса Флоке как

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{21} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \gamma \end{bmatrix}$$

и являются параметрами фазового эллипса, уравнение которого выглядит как

$$\sigma_{22}x^2 - 2\sigma_{21}xx' + \sigma_{11}x'^2 = \varepsilon^2$$

$$(\sigma_{11} = x_{\max}^2, \sigma_{22} = x'_{\max}{}^2, \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{21}^2 = \varepsilon^2, \text{ коэффициент корреляции } r = \sigma_{21} / \sqrt{\sigma_{11}\sigma_{22}}).$$

Преобразование σ -матрицы дается выражением $\sigma = H\sigma_0H^T$ ($H = \{h_{ij}\}$ – матрица преобразования параметров траекторий произвольного участка канала). Отсюда следует, что если коэффициенты σ -матрицы записать как компоненты вектор-столбца ξ ($\xi^T = [\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{22}]$), то их преобразование можно представить в виде $\xi = M\xi_0$, где

$$M = \begin{pmatrix} h_{11}^2 & 2h_{11}h_{12} & h_{12}^2 \\ h_{11}h_{21} & h_{11}h_{22} + h_{12}h_{21} & h_{12}h_{22} \\ h_{21}^2 & 2h_{21}h_{22} & h_{22}^2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Преобразование параметров $\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{22}$ в свободном промежутке при учете дисперсии и многократного кулоновского рассеяния частиц на воздухе имеет вид $\xi = M\xi_0 + \Delta\xi$:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{21} \\ \sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2z & z^2 \\ 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11}^0 \\ \sigma_{21}^0 \\ \sigma_{22}^0 \end{bmatrix} + \delta_p^2 \begin{bmatrix} D^2 \\ DD' \\ D'^2 \end{bmatrix} + \theta^2 \begin{bmatrix} z^2/3 \\ z/2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где z – длина свободного промежутка, $D(z)$ и $D'(z)$ – линейная и угловая дисперсии в пучке, $\delta_p = (p - p_0)/p_0$ – относительный разброс частиц по импульсам, θ – полный угол многократного кулоновского рассеяния частиц в свободном промежутке.

Измерение поперечных размеров пучков

Измерения поперечных размеров пучков ионов углерода проводились весной 2023 года. Для измерений использовался свободный воздушный промежуток, начиная от последней квадрупольной линзы. При этом относительные продольные координаты точек измерения составляли $z = 0, 2, 4$ и 6 м (точка $z = 0$ соответствует началу промежутка). Для каждой энергии пучка измерения проводились одновременно во всех четырех точках.

Положение и размер пучка в поперечной плоскости определялись с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки GafChromic EBT3 [2]*. Структура пленки имеет активный слой толщиной 30 мкм, расположенный между защитными слоями прозрачного полиэстера (полистирола) толщиной 125 мкм каждый. Пленка EBT3 имеет высокое пространственное разрешение < 25 мкм. Максимум поглощения пленки приходится на длину волны 636 нм и находится в видимой зоне красного цвета. Поэтому извлечение красного канала из RGB-изображений (Red, Green, Blue) позволяет улучшить чувствительность сканера при сканировании пленки EBT3.

Все пленки сканировались на планшетном RGB сканере EPSON EXPRESSION 10000 XL в пропускающем режиме с пространственным разрешением 150 точек на дюйм и глубиной цвета 48 бит (по 16 бит на канал) без цветокоррекции. Полученные изображения сохранялись в формате TIFF без сжатия и затем обрабатывались по красному каналу. Значение оптической плотности для каждого пикселя изображения определялось как десятичный логарифм отношения интенсивности цвета до и после облучения пленки. До облучения интенсивность каждого из трех цветов пленки считалась равным 65535 (16-битное значение полной интенсивности). Интегральная интенсивность пучков ионов углерода во время облучения пленок EBT3 составляла примерно $2 \cdot 10^9$ частиц (или 8–10 сбросов пучка).

* Пленка дозиметрическая GAFCHROMIC EBT3. URL: <http://www.gafchromic.ru/docs/EBT3-3.pdf>.

Определение эмиттанса пучка

Согласно выражениям (1–2) полный размер пучка в свободном промежутке зависит от начальных параметров фазового эллипса $\sigma_{11}^0, \sigma_{21}^0$ и σ_{22}^0 следующим образом:

$$\begin{aligned}x^2 &= x_0^2 + \Delta x_0^2, \\x_0^2 &= \sigma_{11}^0 + 2\sigma_{21}^0 z + \sigma_{22}^0 z^2, \\ \Delta x_0^2 &= D^2(z)\delta_p^2 + \theta^2 z^2 / 3 + \sum (\theta_k \Delta z_k)^2,\end{aligned}$$

где x – измеренный размер пучка в точке с относительной координатой z , x_0 – размер невозмущенного монопучка, Δx_0^2 – добавка к квадрату размера монопучка с учетом дисперсии и рассеяния частиц на воздухе и в предыдущих пленках (Δz_k – расстояния до предыдущих пленок, θ_k – углы многократного кулоновского рассеяния в пленках).

Для трех произвольных точек ($i = 0, 1, 2; z_0 = 0$) можно решить систему уравнений

$$\sigma_{11}^0 + 2\sigma_{21}^0 z_i + \sigma_{22}^0 z_i^2 = x^2(z_i) - \Delta x_0^2(z_i)$$

и найти коэффициенты σ -матрицы и эмиттанс пучка $\epsilon_0^2 = \sigma_{11}^0 \sigma_{22}^0 - (\sigma_{21}^0)^2$ в точке z_0 . Так как квадрат размера невозмущенного монопучка описывается полиномом второй степени относительно z , то набор $\{x_0^2(z_i)\}$ для четырех точек фитировался квадратичной функцией $f(z_i, z_i^2)$, которая и использовалась для определения $\sigma_{11}^0, \sigma_{21}^0$ и σ_{22}^0 .

После определения параметров фазового эллипса и эмиттанса пучка после последней квадрупольной линзы можно сделать обратное преобразование фазовых эллипсов в начало канала с учетом рассеяния частиц в вакуумных перегородках. В силу того, что полное преобразование параметров фазового эллипса можно представить в виде $\xi = M\xi_0 + \Delta\xi$, то обратное преобразование может быть записано как

$$\xi_0 = M^{-1}(\xi - \Delta\xi).$$

Моделирование вывода пучка

Для вывода из ускорителя У-70 пучков ионов углерода применяется классическая двухступенчатая схема вывода Пиччиони – Райта [3] с использованием внутренней мишени ВМ и выводного септум-магнита СМ, расположенных в 28 и 34 прямолинейных промежутках (рис. 2). При выводе пучков с энергиями 200, 300 и 400 МэВ/нуклон используются мишени из бериллия толщиной соответственно 1,37, 2,52 и 3,83 мм.

Мишень смещена в радиальном направлении от центра У-70, расстояние между ее кромкой и равновесной орбитой составляет 50 мм. Наведение пучка на внутреннюю мишень и септум-магнит осуществляется посредством шумовой (стохастической) раскачки амплитуд горизонтальных бетатронных колебаний циркулирующего пучка [4]. Для всех режимов вывода импульс частиц после прохождения через мишень уменьшается на ~0,7%. Вышедшие из мишени частицы совершают бетатронные колебания относительно новой, смещенной внутрь кольца равновесной орбиты, и через половину длины волны забрасываются за токовую перегородку выводного септум-магнита.

Начальный эмиттанс пучка в значительной степени зависит от размеров источника. Если в вертикальной плоскости линейный размер источника определяется высотой мишени (ее полный вертикальный размер равен 10 мм), то в горизонтальной плоскости – величиной заброса

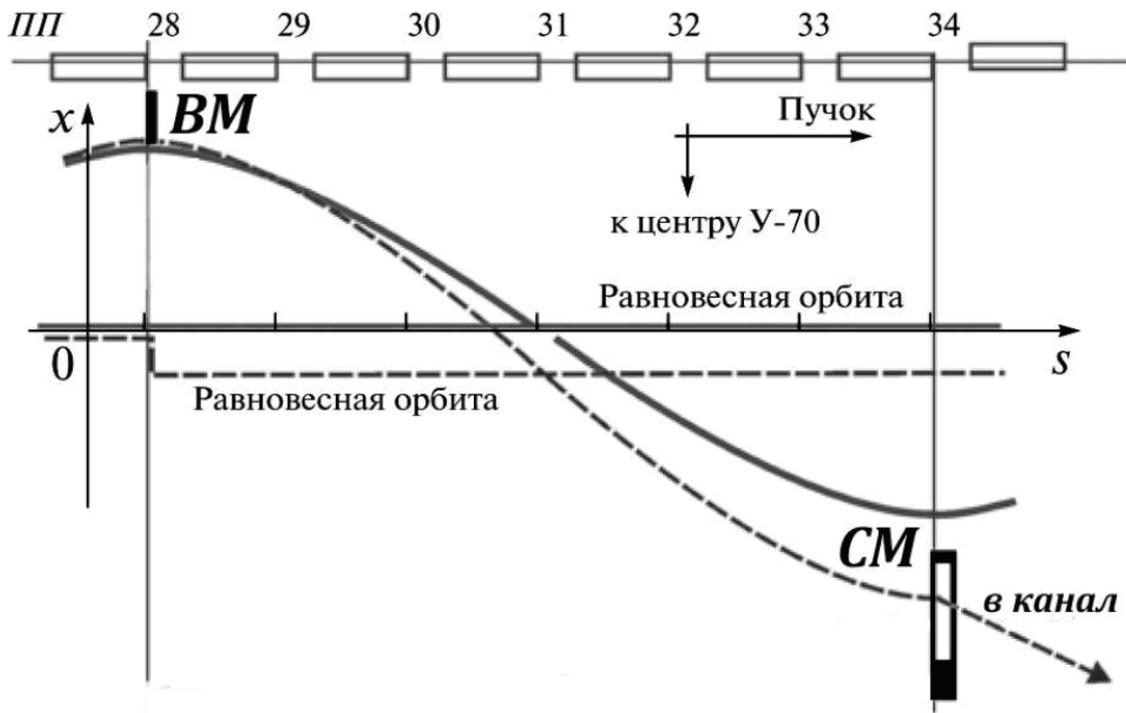


Рис. 2. Принципиальная схема вывода пучка ионов углерода из ускорителя У-70
 Fig. 2. Principal scheme of carbon ion beam extraction from the U-70 accelerator

частиц за кромку мишени. При этом угловой размер определяется в основном многократным кулоновским рассеянием частиц в мишени.

При моделировании вывода пучка из ускорителя предполагалось, что распределение частиц на мишени в горизонтальной плоскости $f(x) = f_1(x) + f_2(x)$. При этом $f_1(x) \sim 10A[1 - (x/\Delta x_1)^2]^{3/2}[4]$ ($0 \leq x \leq x_1 = 1$ мм).

В расчетах также предполагалось, что на мишени относительный разброс частиц по импульсам $\delta p = (p - p_0)/p_0$ описывается нормальным распределением с $\sigma[\delta p] = 0,1\%$ и ограничением по основанию на уровне $\pm 2\sigma[\delta p]$.

Результаты

В таблице приведены расчетные и измеренные (восстановленные) значения бетатронного эмиттанса пучков ионов углерода (т. е. при $\delta p = 0$) перед первой квадруольной линзой для 95%-й интенсивности пучков. Значения линейной D и угловой D' дисперсий в пучке перед первой линзой равны примерно 8 м и 0,8 м соответственно.

Расчетные и измеренные значения эмиттанса пучков (мм·мрад)

Calculated and measured values of the beams emittance (mm·mrad)

Параметр	Горизонтальная плоскость			Вертикальная плоскость		
	200	300	400	200	300	400
Энергия, МэВ/нуклон	200	300	400	200	300	400
Моделирование	12	10	9	23	19	17
Измерение	28	34	36	36	27	31

Сравнение расчетных и измеренных значений эмиттанса пучков показывает, что расчетные значения эмиттанса меньше измеренных для всех начальных энергий, причем для горизонтальной плоскости наблюдаются значительные расхождения.

Необходимо отметить, что существуют определенные трудности с описанием пространственного распределения частиц в горизонтальной плоскости в процессе наведения пучка на внутреннюю мишень посредством шумовой раскачки амплитуд горизонтальных бетатронных колебаний пучка. Кроме того, при моделировании вывода пучка из ускорителя не учитывались следующие процессы, приводящие к увеличению эффективных размеров пучка и, следовательно, значений его эмиттанса:

- рассеянное поле септум-магнита вне токовой перегородки, искажающее траектории частиц циркулирующего пучка как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, и влияющее на распределение частиц на внутренней мишени;
- многократное кулоновское рассеяние ионов углерода в стенках вакуумной камеры кольцевых электромагнитных блоков на участке вывода пучка из ускорителя (в расчетах частицы просто выбывали из рассмотрения);
- так называемая «пробежка пучка», возникающая из-за спада магнитного поля в септум- и трех отклоняющих магнитах в процессе вывода частиц из ускорителя, особенно при более высоких энергиях пучков.

Что касается измеренных значений эмиттанса, то при измерении поперечных размеров граница пучка частиц не очень хорошо определена из-за многократного кулоновского рассеяния ионов углерода в стенках ионопровода, вакуумных перегородках канала и в воздухе. Также на величину эмиттанса влияют неопределенности при взаимном переводе расчетных градиентов магнитного поля в реальные значения токов в квадрупольных линзах, а также неточности в определении эффективной длины линз.

Фактически, приведенные в таблице расчетные значения – это оценка эмиттанса пучков снизу, а измеренные значения – оценка сверху.

Список литературы

1. **Maximov A. V., Antipov Y. M., Britvich G. I. et al.** The carbon ion beam extraction scheme from the U-70 synchrotron for radiobiological researches // *Proceedings of 26th RuPAC2018*. Protvino, 2018. P. 139–141. <https://DOI:10.18429/JACoW-RUPAC2018-FRCAMH01>.
2. **Sorriaux J., Kacperek A., Rossomme S. et al.** Evaluation of Gafchromic EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams // *European Journal of Medical Physics*. 2013. Vol. 29, № 6. P. 599–606.
3. **Piccioni O. et al.** External proton Beam of the Cosmotron // *Rev. Sci.* 1995. Vol. 26. P. 232.
4. **Иванов С. В., Лебедев О. П.** Поперечная шумовая раскачка пучка в синхротроне У-70 // ПТЭ. 2013. № 3. С. 5–11. DOI 10.7868/S0032816213020201

References

1. **Maximov A. V., Antipov Y. M., Britvich G. I. et al.** The carbon ion beam extraction scheme from the U-70 synchrotron for radiobiological researches. *Proceedings of 26th RuPAC2018*, Protvino, 2018. pp. 139–141. <https://doi:10.18429/JACoW-RUPAC2018-FRCAMH01>.
2. **Sorriaux J., Kacperek A., Rossomme S. et al.** Evaluation of Gafchromic EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams. *European Journal of Medical Physics*, 2013, vol. 29, no. 6, pp. 599–606.
3. **Piccioni O. et al.** External proton Beam of the Cosmotron. *Rev. Sci.*, 1995, vol. 26, p. 232.
4. **Ivanov S. V., Lebedev O. P.** Transverse noise blow-up of the beam in the U-70 synchrotron. *Instrum Exp Tech*, 2013, vol. 56, pp. 249–255. <https://doi.org/10.1134/S0020441213020140>

Сведения об авторах

Максимов Александр Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Новосколько Федор Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Синюков Роман Юрьевич, научный сотрудник

Янович Андрей Антонович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Information about the Author

Alexandre V. Maximov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

Fyodor N. Novoskoltsev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher

Roman Yu. Sinyukov, Research Associate

Andrey A. Yanovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;
принята к публикации 14.02.2024*

*The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023;
accepted for publication 14.02.2024*