

ОЦЕНКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОНОВ В КАНАЛЕ РЕЛЬСОТРОНА

А.Е. Качесов

kae@bmstu.ru

SPIN-код: 6739-8773

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнен числовой расчет на основе метода статистического моделирования среднего передаваемого импульса протонами метаемому телу в канале рельсотрона. Проведены анализ полученных данных и оценка оптимальной энергии протонов в плазменном образовании для максимальной передачи импульса в направлении движения метаемому телу в канале рельсотрона. Оптимальная энергия в соответствии с полученными результатами находится в диапазоне 66...67 эВ. Разгон протонов плазменного образования в канале рельсотрона до скорости, отвечающей найденной оптимальной энергии протонов, позволит повысить КПД рельсовых ускорителей, который на момент написания статьи в экспериментальных установках не превышает 40 %

Ключевые слова

Рельсотрон, оптимальная энергия, рассеяние ионов на кристаллической решетке, метаемое тело, математическое моделирование, метод Монте-Карло, упругое рассеяние, потенциал Фирсова

Поступила в редакцию 13.07.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Развитие технологий электромагнитного ускорения масс является одной из приоритетных задач во множестве областей науки и техники, например:

– в работе [1] авторы экспериментально исследовали процесс генерации ударных волн и течение ударно сжатых газов посредством бесподдонного рельсового ускорителя, аналогичного тому, что рассматривается в рамках предложенной работы;

– авторы работы [2] посредством компьютерного моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц описали разрушения материала мишени (рассмотрен частный случай мишени, состоящей из алюминия);

– в исследовании [3] перед авторами стояла задача изучения области выброса растрескавшихся хрупких материалов. Рельсовый ускоритель в качестве объекта исследования в данной работе был выбран в силу того, что профиль ускорений для широкого диапазона начальных скоростей плазменного образования хорошо изучен.

Основным препятствием для массового применения рельсовых ускорителей является низкий КПД (до 30...40 %). Самыми известными причинами потери КПД являются скоростной скин-эффект [4], эффект «убегания» электронов (эмиссионный кризис) [1], а также сложные взаимодействия частиц — носителей тока в плазменном поршне с метаемым телом и стенками канала

рельсотрона [5], анализ последнего аспекта и является предметом настоящего исследования.

Цель данной работы — оптимизация процесса передачи импульса метаемому телу частицами плазменного образования посредством подбора рациональной средней энергии частиц плазменного образования до взаимодействия с разгоняемым телом.

Для решения данной задачи использованы методы математического моделирования взаимодействия ионов с кристаллической решеткой материала метаевого тела. Распространенным методом решения подобных задач является метод Монте-Карло [6–8]. В соответствии с этим методом в рамках решения поставленной задачи каждой инжектируемой частице случайным образом присваивалось начальное направление движения, а начальное расположение для каждой инжектируемой частицы соответствовало геометрическому центру стенки метаевого тела, в которую «врезалось» плазменное образование. Предполагается, что инжектируемые частицы взаимодействуют только с атомами среды.

Расчетная модель. Рассеянию ионов на атомах соответствует классическая функция отклонения, тогда угол Θ в системе центра масс системы «ион — рассеивающий атом» может быть рассчитан как функция прицельного параметра по формуле [9]

$$\Theta = |\pi - 2\chi_0|; \quad \chi_0 = \int_{r_{\min}}^{\infty} \frac{b}{r^2} \frac{dr}{\sqrt{1 - \frac{b^2}{r^2} - \frac{U(r)}{E_r}}}, \quad (1)$$

где r_{\min} — наибольший корень подкоренного выражения (расстояние наибольшего сближения); b — прицельный параметр; E_r — энергия относительного движения; $U(r)$ — потенциал, предложенный в работе [10].

Прицельный параметр в формуле (1) определялся как случайная величина на промежутке (b_{\min}, b_{\max}) — от минимального до максимального значения прицельного параметра, с плотностью распределения

$$p(b) = \frac{2b}{b_{\max}^2 - b_{\min}^2}. \quad (2)$$

Выражение для генератора псевдослучайных чисел с плотностью распределения (2) было получено методом обратных функций:

$$b = (b_{\max}^2 - b_{\min}^2) \sqrt{\gamma + \frac{b_{\min}^2}{b_{\max}^2 - b_{\min}^2}}, \quad (3)$$

где γ — случайная величина, равномерно распределенная на промежутке $(0, 1)$.

За минимальное и максимальное допустимые значения прицельного параметра были выбраны радиус наибольшего сближения и половина минимального расстояния между атомами среды соответственно.

При малых энергиях (малыми полагаются энергии отвечающие скоростям меньше одной атомной единицы скорости, для протонов — порядка десятков электронвольт) частица рассеивается преимущественно упругим образом и потери в этом случае оценивались классическим образом [11]:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 - \frac{2\mu}{m_2} \left(\frac{v}{v_0}\right) \cos\Theta - \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} = 0,$$

где v — скорость рассеявшейся частицы после взаимодействия; v_0 — скорость налетающей частицы до взаимодействия; μ — приведенная масса налетающей частицы и атома материала; m_2 — масса рассеивающего атома; m_1 — масса рассеиваемой частицы.

При движении налетающей частицы со скоростью соизмеримой со скоростями атомных электронов, преобладают неупругие потери, которые в данном случае могут быть оценены с помощью формулы Кишиневского [12]

$$\Delta E = \frac{0,3 \cdot 10^{-7} Z_2 (\sqrt{Z_2} + \sqrt{Z_1}) [Z_2^{1/6} + Z_1^{1/6}]}{\left[1 + \frac{0,67 \sqrt{Z_2} r_{\min}}{A_\Phi (Z_2^{1/6} + Z_1^{1/6})}\right]^3} \left[1 - 0,68 \frac{U(r_{\min})}{E_r}\right] v,$$

$$A_\Phi = \frac{a_{\text{ТФ}}}{(\sqrt{Z_1} + \sqrt{Z_2})^{2/3}}$$

где ΔE — неупругие потери энергии, эВ; Z_1, Z_2 — атомные номера налетающего иона и атомов тормозящей среды соответственно, r_{\min} — расстояние наибольшего сближения, см; v — относительная скорость набегающих частиц, см/с, A_Φ — фирсовская длина экранирования, $a_{\text{ТФ}}$ — константа Томаса — Ферми, равная $0,47 \text{ см}^{-8}$.

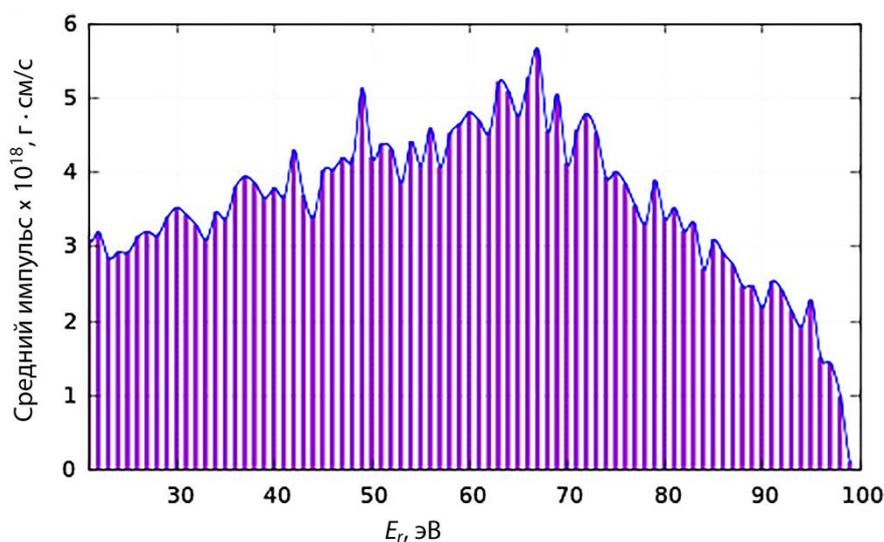
Для проведения численных экспериментов в качестве материала метаемого тела выбран алюминий (Al), а в качестве инжектируемых частиц — протоны. Алюминий обладает гранецентрированной кубической решеткой. Период кристаллической решетки для алюминия составляет $4,05 \text{ см}^{-8}$, а наименьшее расстояние между атомами (из геометрических соображений) составляет $2,86 \text{ см}^{-8}$. Та-

ким образом получен необходимый набор данных для задания положения узлов решетки в области решения задачи.

При движении частицы в метаемом теле, представленном совокупностью рассеивающих потенциалов, в выбранном направлении выделялась подобласть решения задачи – набор потенциалов, на которых могла бы рассеяться частица. Данная подобласть ограничивалась двумя прямыми с коллинеарными направляющими векторами, равноудаленными от траектории частицы на максимальное значение прицельного параметра. Для потенциалов, попавших в описанную выше подобласть, генерировалось значение прицельного параметра (3). Если значение прицельного параметра для определенного потенциала превышало расстояние от рассеивающего центра до траектории движения частицы, тогда предполагалось, что частица рассеялась на этом потенциале. Процесс генерации новых значений прицельного параметра продолжается до тех пор, пока частица не покинет область решения задачи или не «остановится».

На основе полученных данных выполнен расчет импульса, переданного частицей телу вдоль продольной оси рельсотрона. Переданный импульс учитывали исключительно в тех случаях, когда частица покидала область решения задачи через ту же границу, через которую туда инжектировалась. Его определяли как разность проекций на продольную ось рельсотрона начального импульса частицы и импульса частицы при покидании области решения задачи.

Обсуждение результатов. Для оценки вклада частиц в разгон метаемого тела было проведено 500 численных экспериментов. Для удобства представления результатов частицы были разделены по начальной энергии относительного движения (начальная скорость представлена в проекции на продольную ось рельсотрона) на группы шириной по 1 эВ. На рисунке представлена гистограмма зависимости среднего (отнесенного к количеству частиц в группе) переданного «на разгон» импульса от начального значения относительной энергии.



Гистограмма зависимости среднего переданного «на разгон» импульса от начального значения относительной энергии

Как видно из результатов моделирования, максимальное значение переданного импульса для данной модели достигается в группе от 66 до 67 эВ и достигает $5,64 \cdot 10^{-18}$ г · см/с.

Заключение. В текущем виде расчетная модель не учитывает ряд физических эффектов, присущих как поведению отдельно взятой частицы плазменного образования, проникающей внутрь метаемого тела, так и поведению самого плазменного образования до взаимодействия с телом. Прежде всего модель не учитывает перезарядку, введение которой очень серьезно скажется на результатах. Вследствие рассмотрения только протонов модель не требует введения эффекта обдирки.

Как показано в работе [13], в рельсотроне должны наблюдаться стратификации плазменного образования, что, возможно, следует учесть в расчетной модели в дальнейшем. Также планируется моделирование проникновения частиц реального плазменного образования в канале рельсотрона (с концентрациями частиц порядка 10^{16} см⁻³) в метаемое тело, что позволит учесть возможные распределения по энергиям этих частиц, такие как распределения Дюрвестейна — Давыдова [14]. Это и обобщение модели на случай трех измерений с учетом возможного взаимодействия частиц в последней является целью предстоящей работы.

Литература

- [1] Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О. и др. Сильные ударные волны и особенности течений ударно-сжатых газов в каналах рельсовых ускорителей. *ЖТФ*, 2015, т. 85, № 1, с. 39–46.
- [2] Fortov V.E., Lebedev E.F., Luzganov S.N. et al. Railgun experiment and computer simulation of hypervelocity impact of lexan projectile on aluminum target. *Int. J. Impact Eng.*, 2006, vol. 33, no. 1, pp. 253–262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.008>
- [3] Schneider M., Vincent G., Hogan J.D. et al. The use of a railgun facility for dynamic fracture of brittle materials. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2015, vol. 43, no. 5, pp. 1162–1166. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2396081>
- [4] Hsu S.C. Experimental characterization of railgun-driven supersonic plasma jets motivated by high energy density physics applications. *Phys. Plasmas*, 2012, vol. 19, art. 123514. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4773320>
- [5] Жуков Б.Г., Резников Б.Г. Влияние плотности газа на движение свободного плазменного поршня в канале рельсотрона. *ЖТФ*, 2007, т. 77, № 7, с. 43–49.
- [6] Betz H.D. Charge states and charge-changing cross sections of fast heavy ions penetrating through gaseous and solid media. *Rev. Mod. Phys.*, 1972, vol. 44, no. 3, pp. 465–539. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.44.465>
- [7] Ninov V., Armbruster P., Hesberger F.P. et al. Separation of actinide-made transurania by a gas-filled magnetic separator. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1995, vol. 357, no. 2-3, pp. 486–494. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01701-8](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01701-8)

-
- [8] Paul M., Glagola B.G., Henning W. et al. Heavy ion separation with a gas-filled magnetic spectrograph. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1989, vol. 277, no. 2-3, pp. 418–430. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90771-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90771-7)
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Механика*. М., Наука, 1973.
- [10] Щербаков А.П. Методы компьютерного моделирования процессов атомного рассеяния в задачах научного приборостроения. *Научное приборостроение*, 2003, т. 13, № 1, с. 14–23.
- [11] Голдстейн Г. *Классическая механика*. М., Наука, 1975.
- [12] Кишиневский Л.М. Неупругие потери и сечение ионизации. *Известия АН СССР. Серия физич.*, 1962, т. 26, с. 1410–1414.
- [13] Gerasimov Yu.V., Maslov A.G., Kachesov A.E. et al. Dynamics of plasma piston composition. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1348, art. 012053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1348/1/012053>
- [14] Кудрявцев А.А., Цендин Л.Д. Механизмы формирования функции распределения электронов в положительном столбе разряда в условиях существования «парадокса Ленгмюра». *ЖТФ*, 1999, т. 69, № 11, с. 34–41.

Качесов Александр Евгеньевич — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Еркович Ольга Станиславовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Качесов А.Е. Оценка рациональных энергетических параметров протонов в канале рельсотрона. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 08(61). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-08-723>

ESTIMATION OF RATIONAL ENERGY PARAMETERS OF PROTONS IN THE RAILGUN CHANNEL

A.E. Kachesov

kae@bmstu.ru

SPIN-code: 6739-8773

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The author performed a numerical calculation based on the statistical modeling method of the average impulse transmitted by protons to the projectile body in the railgun channel. The author carried out the analysis of the data obtained and the estimation of the optimal proton energy in the plasma formation for the maximum transfer of momentum in the motion direction to the projectile in the railgun channel. The optimal energy in accordance with the results obtained is in the range 66 ... 67 eV. Acceleration of plasma protons in the railgun channel to a speed corresponding to the found optimal proton energy will increase the efficiency of railguns, which currently does not exceed 40% in experimental facilities.

Keywords

Railgun, optimal energy, ion scattering on a crystal lattice, projectile body, mathematical modeling, Monte Carlo method, elastic scattering, Firsov potential

Received 13.07.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Bobashev S.V., Zhukov B.G., Kurakin R.O. et al. Intense shock waves and shock-compressed gas flows in the channels of rail accelerators. *ZhTF*, 2015, vol. 85, no. 1, pp. 39–46 (in Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys.*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784215010053>)
- [2] Fortov V.E., Lebedev E.F., Luzganov S.N. et al. Railgun experiment and computer simulation of hypervelocity impact of lexan projectile on aluminum target. *Int. J. Impact Eng.*, 2006, vol. 33, no. 1, pp. 253–262. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.008>
- [3] Schneider M., Vincent G., Hogan J.D. et al. The use of a railgun facility for dynamic fracture of brittle materials. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2015, vol. 43, no. 5, pp. 1162–1166. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2396081>
- [4] Hsu S.C. Experimental characterization of railgun-driven supersonic plasma jets motivated by high energy density physics applications. *Phys. Plasmas*, 2012, vol. 19, art. 123514. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4773320>
- [5] Zhukov B.G., Reznikov B.G. Influence of the gas density on the motion of a free plasma piston in the railgun channel. *ZhTF*, 2007, vol. 77, no. 7, pp. 43–49 (in Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys.*, 2007, vol. 52, no. 2, pp. 865–871. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784207070079>)
- [6] Betz H.D. Charge states and charge-changing cross sections of fast heavy ions penetrating through gaseous and solid media. *Rev. Mod. Phys.*, 1972, vol. 44, no. 3, pp. 465–539. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.44.465>
- [7] Ninov V., Armbruster P., Hesberger F.P. et al. Separation of actinide-made transurania by a gas-filled magnetic separator. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1995, vol. 357, no. 2-3, pp. 486–494. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01701-8](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01701-8)

-
- [8] Paul M., Glagola B.G., Henning W. et al. Heavy ion separation with a gas-filled magnetic spectrograph. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A*, 1989, vol. 277, no. 2-3, pp. 418–430. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90771-7](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90771-7)
- [9] Landau L.D., Lifshits E.M. *Mekhanika* [Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1973 (in Russ.).
- [10] Shcherbakov A.P. Computer simulation of atom scattering as applied to problems of scientific instrumentation. *Nauchnoe priborostroenie*, 2003, vol. 13, no. 1, pp. 14–23. (in Russ.).
- [11] Goldstein H. *Classical mechanics*. Addison-Wesley, 1950. (Russ. ed.: *Klassicheskaya mekhanika*. Moscow, Nauka Publ., 1975.)
- [12] Kishinevskiy L.M. Inelastic losses and ionization cross section. *Izvestiya AN SSSR. Seriya fizich.*, 1962, vol. 26, pp. 1410–1414 (in Russ.).
- [13] Gerasimov Yu.V., Maslov A.G., Kachesov A.E. et al. Dynamics of plasma piston composition. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1348, art. 012053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1348/1/012053>
- [14] Kudryavtsev A.A., Tsendin L.D. Mechanisms for formation of the electron distribution function in the positive column of discharges under Langmuir-paradox conditions. *ZhTF*, 1999, vol. 69, no. 11, pp. 34–41. (Eng. version: *Tech. Phys.*, 1999, vol. 44, no. 11, pp. 1290–1297. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1259512>)

Kachesov A.E. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Erkovich O.S., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kachesov A.E. Estimation of rational energy parameters of protons in the railgun channel. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 08(61). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-08-723.html> (in Russ.).