

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТНЫХ КВАДРУПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

© 2026 г. Л. Ю. Овчинникова^а *, В. В. Парамонов^а

^аИнститут ядерных исследований Российской академии наук, Москва, 117312 Россия

*E-mail: lubovch@inr.ru

Поступила в редакцию 18.04.2025 г.

После доработки 18.04.2025 г.

Принята к публикации 30.04.2025 г.

Проведен сравнительный анализ характеристик различных конфигураций компактных квадрупольных на основе постоянных магнитов PMQ (Permanet Magnetic Quadrupole) для применения в компактных линейных ускорителях протонов (ЛУП) прикладного назначения. В широком диапазоне размеров элементов исследованы конфигурации классических вариантов (КВ), с различным количеством M сегментов из постоянных магнитов (ПМ), так и гибридных вариантов (ГВ) с полюсами из ферромагнетика (ФМ).

Ключевые слова: протонная терапия, линейный ускоритель, квадрупольная линза

DOI: 10.56304/S2079562926010331

1. ВВЕДЕНИЕ

Компактный протонный линейный ускоритель ИЯИ для протонной терапии [1] требует в фокусирующих элементах градиента магнитного поля до 214 Тл/м. В аналогичных проектах IM-PLART [2] и LIGHT [3] используются ПМ квадруполь, что позволяет обеспечить компактность при высоком интегральном градиенте и малых мультипольных добавках. Кроме того, возможна подстройка градиента и положения магнитной оси.

Разработанные на основе ПМ квадруполь [4, 5] нашли широкое применение в ускорителях заряженных частиц. Они являются единственным решением для фокусировки в компактном линейном ускорителе протонов для терапии.

2. МЕТОДИКА

Используя современные средства численного решения 3D задачи нелинейной магнитостатики, в широком диапазоне изменения размеров эле-

ментов исследованы характеристики конфигураций, показанных на рис. 1.

Были рассмотрены два варианта магнитных материалов: Sm_2Co_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{Br}$ и два варианта материала полюсов: пермендюр и сталь 1010. Варьировались следующие параметры: количество сегментов, радиус апертуры, внешний радиус полюсов, внешний радиус линзы, угол раскрытия. Всего было рассмотрено 4240 вариантов (рис. 2). Анализировались следующие характеристики: максимальный и интегральный градиенты, коэффициенты мультипольного разложения по углу и некоторые другие.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

PMQ (Permanet Magnetic Quadrupole) без ферромагнитных вставок позволяют достичь максимального градиента магнитного поля в 694 Тл/м и интегрального градиента 27.8 Тл. PMQ с ферромагнитными вставками позволяют достичь максимального градиента 1008 Тл/м и интегрального градиента 41.3 Тл, что в ~1.4 раз больше, чем в конфигурациях без ферромагнитных вставок.

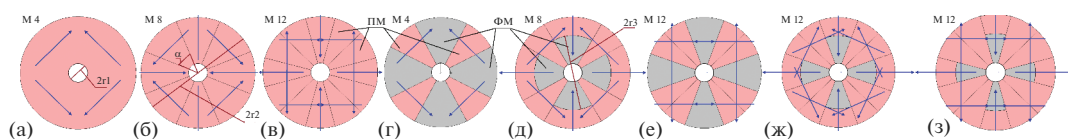


Рис. 1. Конфигурации PMQ для которых проведен анализ характеристик.

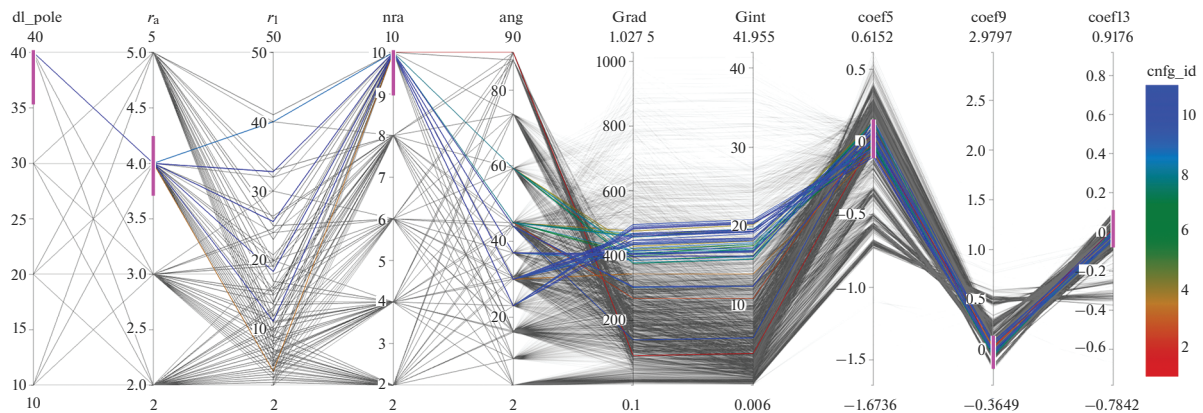


Рис. 2. Параметры и характеристики квадруполов, представленные в виде графика в параллельных координатах. Каждая точка данных — линия, пересекающая ряд параллельных осей, соответствующих разным переменным. Всего рассматривалось 4240 вариантов. Видно, что максимальный Grad достигается при c_5 , c_9 и c_{13} близких к 0. При параметрах PMQ для компактного линейного протонного ускорителя максимальный Grad достигает ~500 Тл/м.

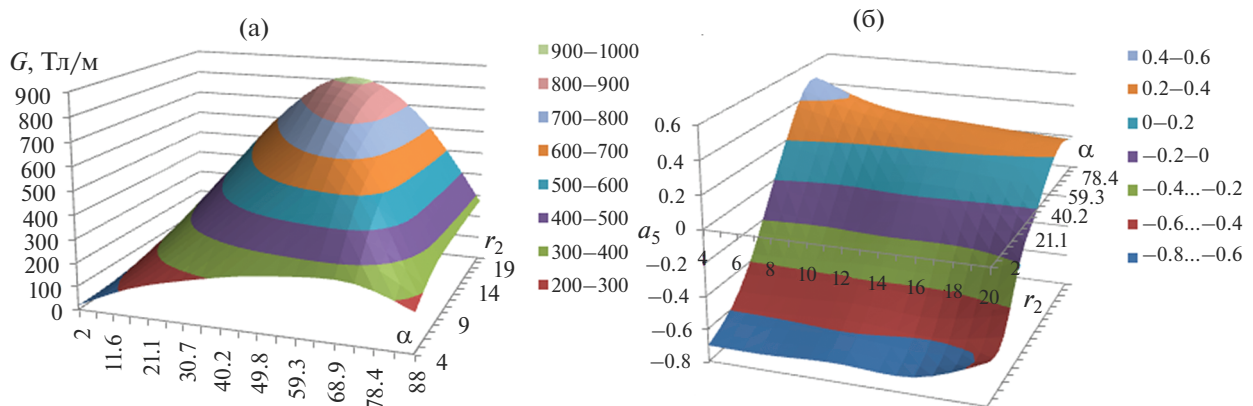


Рис. 3. Поверхности уровня $G(\alpha, r_2)$ (а) и $a_5(\alpha, r_2)$ (б) при $r_1 = 2$ мм, $dl = 40$ мм для конфигурации на рис. 1г.

Комбинированные PMQ позволяют еще улучшить характеристики и достичь максимального градиента 1027 Тл/м и интегрального градиента 41.9 Тл.

Если ограничить рассмотрение параметрами PMQ подходящими для компактного линейного протонного ускорителя: Sm_2Co_5 + пермендюр, $r_i = 4$ мм, $r_o = 4$ мм, $l = 40$ мм, то комбинированные PMQ позволяют достичь максимального градиента 496 Тл/м и интегрального градиента 20.8 Тл (рис. 2), что обеспечивает более чем двухкратный запас относительно требуемых значений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех вариантов выполняется основная зависимость величины фокусирующего градиента $G \sim B_r/r_1(1 - r_1/r_2)$. Введение полюсов ФМ, ГВ на рис. 1г–1з, существенно (при $M = 4.8$ в разы) по-

вышает, по сравнению с аналогичными PMQ, величину реализуемого G . При малых величинах $r_1 \sim 2$ мм в ГВ G достигает величины до 1000 Тл/м и более, см. рис. 3а. Для каждого ГВ существует зависимость угла раскрытия сегмента ПМ $\alpha_1(M, r_2/r_1, r_3/r_1, dl)$ для получения $G_{\max}$. При высоких значениях G торцы полюсов ФМ находятся в режиме насыщения. В приграничных областях величин α возрастает уровень мультипольных добавок в распределении индукции B , см. рис. 3б. Но всегда в ГВ существует вторая зависимость $\alpha_2(M, r_2/r_1, r_3/r_1, dl)$, обеспечивающая $a_5 = 0$ и близкая к $\alpha_1(M, r_2/r_1, r_3/r_1, dl)$. Поэтому всегда можно найти компромиссное решение ГВ.

5. ВЫВОДЫ

Результаты исследования позволяют выбрать оптимальный вариант для разработки фокусиру-

ющего элемента, удовлетворяющий как необходимым физическим требованиям, так и условиям технологической реализуемости.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны А.П. Дуркину за предоставленные данные о характеристиках фокусирующей части ЛУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A.A.* A Linear Accelerator for Proton Therapy. Proc. RuPAC'21. 2021.

Conf. 2021. Alushta, Russia. Geneva: JACow Publ. V. 27. P. 117–119.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04>

2. *Picardi L. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2020. V. 23. P. 020102.
3. *Degiovanni A. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2024. V. 27. P. 054701.
4. *Lazarev N.V., Skachkov V.S.* Tipless Quadrupole Lenses. Proc. 1979 Linac Conf. 1979. P. 380.
5. *Halbach K.* IEEE Trans. Nucl. Sci. 1979. V. 26. P. 3882.

Characteristics of Compact Quadrupoles Based on Permanent Magnets

L. Yu. Ovchinnikova¹, * and V. V. Paramonov¹

¹*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

**e-mail: lubovch@inr.ru*

Received April 18, 2025; revised April 18, 2025; accepted April 30, 2025

Abstract—A comparative analysis of the characteristics of various configurations of compact quadrupoles based on permanent magnets for use in compact linear proton accelerators (LPA) for applied purposes was carried out. Configurations of classical variants (CV), with different numbers of M segments made of permanent magnets (PM), and hybrid variants (HV) with ferromagnetic (FM) poles were investigated in a wide range of element sizes.

Keywords: proton therapy, linear accelerator, quadrupole magnet