

УДК 621.318.23

## ГИБРИДНАЯ КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА ДЛЯ ФОКУСИРУЮЩЕГО КАНАЛА КОМПЛЕКСА DARIA

© 2023 г. И. В. Кильметова<sup>a, \*</sup>, А. В. Козлов<sup>a</sup>, Г. Н. Кропачев<sup>a, b</sup>, Т. В. Кулевой<sup>a</sup>, Д. А. Лякин<sup>a</sup>, О. С. Сергеева<sup>a</sup>, В. С. Скачков<sup>a</sup>, Ю. Б. Стасевич<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

<sup>b</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

\*e-mail: irina.kilmetova@itep.ru

Поступила в редакцию 20.12.2022 г.

После доработки 14.02.2023 г.

Принята к публикации 14.02.2023 г.

Приведены результаты синтеза и электромагнитного расчета квадрупольной линзы гибридной конструкции для протонного линейного ускорителя компактного нейтронного источника DARIA. Линза включает в себя магнитотвердый квадруполь с фиксированным градиентом магнитного поля и вспомогательный электромагнитный квадруполь, возбуждаемый импульсным током. Магнитотвердый квадруполь выполнен из радиационно-стойкого редкоземельного магнита, а электромагнитный квадруполь предназначен для компенсации потерь намагниченности постоянных магнитов, возникающих вследствие радиационной деградации по мере накопления нейтронного флуенса при эксплуатации ускорителя. Рассмотрена возможность применения гибридной квадрупольной линзы для быстрой перестройки фокусирующего канала ускорителя под ионные пучки с различным отношением массы иона к его заряду.

**Ключевые слова:** квадруполь, генератор нейтронов, гибридная линза, электромагнитный расчет, ионный пучок, протонный ускоритель, электромагнитная линза, магнитотвердый квадруполь.

**DOI:** 10.31857/S1028096023070063, **EDN:** TDOAMS

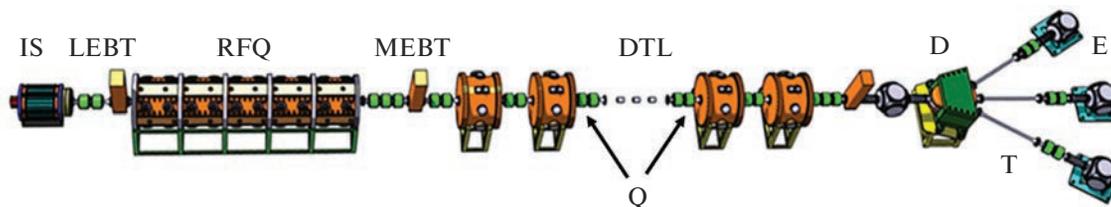
### ВВЕДЕНИЕ

Проект DARIA (Dedicated for Academical Research and Industrial Application) предусматривает разработку и создание компактного источника нейтронов университетского класса, предназначенного для решения научных задач, совершенствования нейтронных методик, прикладных исследований, образовательных целей и промышленного применения, и его запуск в серийное строительство [1]. Комплекс DARIA, схема которого изображена на рис. 1, может быть применен в университетах, научных центрах и на промышленных предприятиях. По масштабам решаемых задач в одном научно-производственном комплексе многоцелевая установка DARIA, по существу, является установкой Mega-Science.

И.М. Капчинский одним из первых предложил использовать линейный ионный ускоритель в качестве драйвера нейтронного источника. В [2] описаны схема и предварительные параметры установки, содержащей ускоряющую секцию с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ – Radio Frequency Quadrupole) и линейный ускоритель с трубками дрейфа (DTL – Drift Tube Linac). Фокусировка пучка осуществ-

ляется магнитотвердыми квадрупольными линзами, располагаемыми внутри трубок дрейфа. В настоящее время в Курчатовском комплексе теоретической и экспериментальной физики разрабатывают линейный ускоритель, являющийся составной частью комплекса DARIA [3]. Он функционирует на высокой частоте 162.5 МГц и производит импульсный пучок протонов с энергией 13 МэВ: ток 100 мА, длительность импульса 100 мкс при частоте повторения 100 Гц. Он состоит из ионного источника и двух ускоряющих секций – RFQ длиной  $\approx 5.4$  м и DTL длиной  $\approx 5.9$  м (рис. 1). Канал транспортировки пучка низкой энергии доставляет протонные пучки от ионного источника к входу в секцию RFQ и обеспечивает наилучший захват протонов в процесс ускорения. Предварительно ускоренный в секции RFQ пучок ионов подают в секцию DTL с помощью промежуточного канала, осуществляющего шестимерное согласование пучка. Протоны, ускоренные до конечной энергии, с помощью магнита-манипулятора разводят по различным каналам в экспериментальные боксы.

Разрабатываемый ускоритель предназначен для работы в режиме малой скважности (коэффициент заполнения в рассматриваемом случае со-



**Рис. 1.** Схема ускорительного комплекса DARIA: IS – ионный источник; LEVT – низкоэнергетичный канал транспортировки пучка; RFQ – структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; MEVT – канал транспортировки пучка средней энергии; DTL – линейный ускоритель с трубками дрейфа; D – магнит-манипулятор; T – каналы разводки пучка в экспериментальные боксы; E – экспериментальные боксы; Q – квадрупольные линзы фокусирующего канала.

ставляет значительную величину 1%), что накладывает на ускоряющие структуры дополнительные ограничения. Особенностью ускорителей с таким режимом работы является требование почти 100%-ной трансмиссии (практически отсутствия потерь) как канала DTL, так и других ускоряющих структур, особенно при высоких энергиях ионов. В этом случае в канале DTL станет возможным избегать чрезмерной активации конструкции ускорителя. В таких условиях квадрупольные линзы фокусирующего канала могут быть выполнены на основе постоянных магнитов, что снижает затраты на электроэнергию в ходе эксплуатации установки. Опыт разработки фокусирующих каналов с магнитотвердыми квадрупольными линзами для сильноточных линейных ионных ускорителей подтвердил работоспособность и эффективность применения постоянных магнитов в ускорительной технике [4, 5].

При разработке канала DTL принята концепция, согласно которой эта секция будет состоять из цепочки отдельных, индивидуально фазированных ускоряющих резонаторов с фокусирующими магнитными квадрупольными линзами, размещаемыми между этими резонаторами.

В ускорителе с единственным сортом ускоряемого иона во время эксплуатации не возникает необходимости варьировать градиенты квадрупольных фокусирующих каналов до тех пор, пока внешние факторы, такие как изменения рабочей температуры, старение или радиационное облучение, не приведут к существенным изменениям намагниченности магнитного материала.

Дестабилизирующее действие первых двух факторов обычно удается нейтрализовать простейшими средствами – искусственным состариванием магнитного материала и стабилизацией рабочей температуры [6]. Для этого часто достаточно применить естественную конвекцию, если линза эксплуатируется в атмосфере, а не в трубке дрейфа или высокоом вакууме резонаторов. Третий фактор требует особой осторожности, если ускоритель сильноточный и, кроме того, предназначен для ускорения ионов до значительной выходной энергии. Ситуация существенно ослож-

няется, если ускоритель эксплуатируется в режиме ионной фабрики, когда в течение нескольких десятков лет на облучаемых объектах в экспериментальных боксах нарабатывается огромный флуенс ускоренных ионов. Тогда потери ускоренного пучка в ускорительном тракте могут вызывать значительную радиационную деградацию магнитного материала [7, 8]. Для увеличения срока службы фокусирующего канала в этом случае приходится вводить дополнительные средства: защиту постоянных магнитов от прямого попадания рассеянного ускоренного пучка, снижение выхода нейтронов из стенок вакуумной камеры [9], применение радиационно наиболее стойких магнитных материалов, например, постоянного магнита из сплава  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ . В частности, именно по этим соображениям предпочтительно отклонять ускоренный пучок перед вводом его в горячую зону так, чтобы обратное рассеяние нейтронов в сторону ускорителя и его оборудования стало невозможным. Если этих средств недостаточно, то для компенсации потери намагниченности постоянных магнитов можно использовать магнитотвердую линзу с механической регулировкой градиента либо линзы гибридной конструкции путем введения дополнительного электромагнита, работающего в режиме постоянного тока либо в импульсном режиме.

### ПРОЕКТ DARIA: УСКОРЯЮЩАЯ СЕКЦИЯ DTL

В разрабатываемой секции DTL при увеличении энергии частиц кратность периода фокусировки снижается:  $K_F = 5 \rightarrow 3.6$ , поскольку растут только длины трубок дрейфа, а длины линз остаются постоянными. Снижение кратности  $K_F$  позволяет постепенно уменьшать набег фазы поперечных колебаний частиц, радиус пучка и акцептанс канала не уменьшаются. Выбирая закон изменения набега фазы, можно снизить градиент магнитной линзы и обеспечить требуемый акцептанс, а также найти условия, при которых градиент и длина магнитной линзы постоянны вдоль всего канала. В частности, при линейном умень-

**Таблица 1.** Основные расчетные параметры секции DTL

Ускоряемые ионы	$p^+$
Энергия пучка, МэВ	3.3–13.2
Ток инжекции, мА	99.5
Длительность пучка, мкс	100
Период следования импульсов пучка, мс	10
Отношение акцептанса канала к эмиттансу пучка в точке инжекции в секцию	3
Структура периода фокусировки	ФОД
Число периодов фокусировки	6
Апертура линзы, мм	60
Градиент фокусирующего поля, Тл/м	14.64
Количество магнитных квадрупольных линз	12
Кратность периода фокусировки	5–3.6

**Таблица 2.** Проектные параметры квадрупольной линзы для DTL комплекса DARIA

Число линз в DTL	Материал	Количество секторов	Радиус апертуры, мм	Внешний радиус, мм	Длина, мм	Интеграл градиента, Тл
12	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	24	31	51	120	3.1

шении набега фазы  $85^\circ \downarrow 60^\circ$  абсолютная величина градиента магнитной линзы остается постоянной вдоль канала DTL и равной 14.64 Тл/м (табл. 1). Этот путь открывает возможность сделать фокусирующий канал из полностью одинаковых линз как по геометрическим, так и по магнитным параметрам, что существенно упрощает изготовление канала и удешевляет ускоритель.

Период типа ФОД (способ чередования фокусирующих, дефокусирующих линз и холостых промежутков) удовлетворяет требованиям к разрабатываемой секции DTL. При использовании пятизакорных резонаторов можно увеличить период фокусировки до  $5\beta\lambda$  ( $\beta$  – приведенная скорость протона,  $\lambda$  – длина волны высокочастотного поля) и обеспечить требуемую величину нормализованного акцептанса. В табл. 1 приведены основные параметры секции DTL комплекса DARIA. Как видно из табл. 2, разрабатываемый канал DTL состоит из шести периодов фокусировки типа ФОД, каждый из которых содержит пятизакорный резонатор и две квадрупольные линзы на постоянных магнитах с постоянными градиентами 14.64 Тл/м, различающимися только знаком. Этот канал обеспечивает величину акцептанса  $15 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  при выходной энергии 13.2 МэВ.

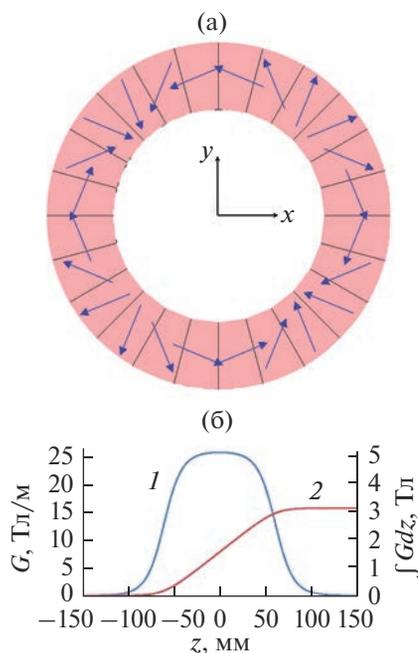
Весьма ценным свойством выбранного типа периода фокусировки является малый диапазон изменения градиентов магнитных линз; практически они отличаются друг от друга только знаком.

### КВАДРУПОЛЬ С ФИКСИРОВАННЫМ ГРАДИЕНТОМ

В настоящее время проект DARIA предусматривает ускорение только протонных пучков. Поэтому для обеспечения фокусировки в канале DTL предполагается использовать разработанную в Институте теоретической и экспериментальной физики квадрупольную линзу на постоянных магнитах из сплава  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  длиной 120 мм, радиусом внутреннего отверстия вакуумной камеры 30 мм и максимальным интегралом градиента 3.1 Тл (табл. 2). Первоначально теория и конструкция таких линз описаны в [10–12].

Для проведения динамических расчетов получено 3D распределение магнитного поля в секторной квадрупольной линзе из сплава  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  с остаточной индукцией  $B_r = 1.05$  Тл, обеспечиваемой современным уровнем производства постоянных магнитов этого класса. Распределение намагниченности в линзе с  $N_s = 24$  секторами показано на рис. 2а. При магнитной апертуре  $r_a$ , внешнем радиусе  $r_{\text{out}}$  и длине  $L_{\text{quad}}$  (табл. 2) в идеальном случае можно достичь градиента магнитного поля  $G_{\text{ideal}} = 2B_r(1/r_a - 1/r_{\text{out}}) = 26.6$  Тл/м, а интеграл градиента составил бы  $G_{\text{ideal}}L_{\text{quad}} = 3.19$  Тл.

В секторном квадруполе вследствие дискретности распределения намагниченности градиент и интеграл градиента несколько меньше. В рассматриваемом случае при выбранном количестве магнитных элементов расчетное значение интеграла градиента, не учитывающее погрешностей геомет-

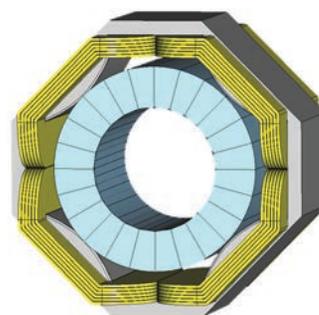


**Рис. 2.** Распределение намагниченности в квадрупольной линзе (а), а также продольное распределение градиента (1) и интеграла градиента (2) (б).

рии и ориентации намагниченности при изготовлении секторов, составляет 3.12 Тл (рис. 2б), что только на ~2% ниже идеального. Поскольку на поверхности апертуры поле составляет только ~0.82 Тл, достаточно применять самарий-кобальтовый постоянный магнит с невысокой коэрцитивной силой  $H_{Cl} \geq 1.2 \times 10^6$  А/м. Область действия магнитного поля составляет около 200 мм. Выбранный режим значительно ниже достигнутого в настоящее время [13]: при градиенте более 120 Тл/м индукция на полюсе составляет более 1.8 Тл.

### ГИБРИДНЫЙ КВАДРУПОЛЬ ДЛЯ DARIA

Отмеченная выше опасность снижения намагниченности постоянного магнита вследствие радиационной деградации побуждает принять меры по восстановлению заданного интеграла градиента линзы. Механическая регулировка имеет ограниченный ресурс и требует дополнительных уси-



**Рис. 3.** Гибрид с явнополюсным электромагнитом.

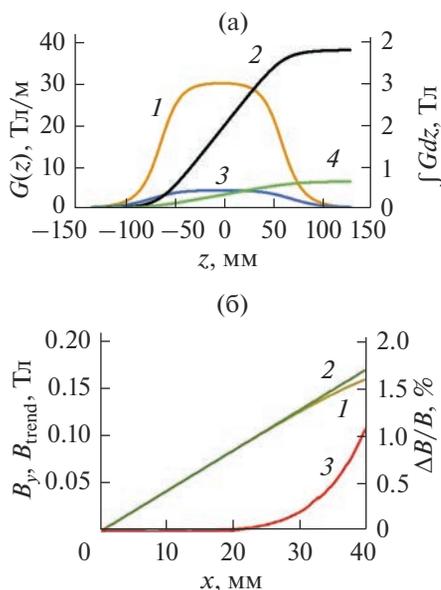
лий для снижения влияния смещения магнитной оси линзы относительно оптической оси канала ускорителя на динамику пучка. Электромагнитная регулировка в этом смысле предпочтительна.

На рис. 3 представлен гибрид, в котором основной магнит такой же, что и в случае, рассмотренном выше (рис. 2а), а электромагнит представлен явнополюсной квадрупольной линзой, расположенной снаружи магнитотвердого квадруполья. В такой конструкции из-за удаленности магнитных полюсов от рабочей области возникает раннее ограничение максимального градиента, так что практически эффективности гибрида можно достичь в небольшом (до ±20% от среднего) диапазоне регулировки интеграла градиента по сравнению с его средней величиной.

Указанного диапазона регулировки поля достигают при токе на-полюс до 5 кА. В проводнике катушки с 24 витками плотность тока 36 А/мм<sup>2</sup>. В этих условиях для снижения средней мощности необходим импульсный режим питания, причем для обеспечения частотного режима и скважности работы ускорителя (табл. 1) потребуется трапецеидальная форма импульса тока возбуждения с плоской вершиной длительностью 100 мкс и минимальной в основании [14]. Такое решение позволит снизить мощность рассеяния в 30–50 раз (табл. 3), хотя потребует введения усиленной конвекции.

**Таблица 3.** Параметры гибридной линзы

Магнитная апертура электромагнитного квадруполья, мм	107
Геометрическая длина, мм	120
Градиент поля гибрида, Тл/м	30
Интеграл градиента, Тл	3.7
Нелинейность на расстоянии 75% от $r_a$ , %	Менее 0.7
Ток возбуждения, А	210
Мощность рассеяния (постоянный ток), кВт	5



**Рис. 4.** Продольное распределение градиента магнитного поля в гибриде (1) и его интеграла (2), а также вклад градиента поля электромагнита (3) и его интеграл (4) (а). Действительное  $B_y$  (1) и линейное  $B_{\text{trend}}$  (2) распределения поля, а также отклонение распределений  $\Delta B/B$  (3) (б).

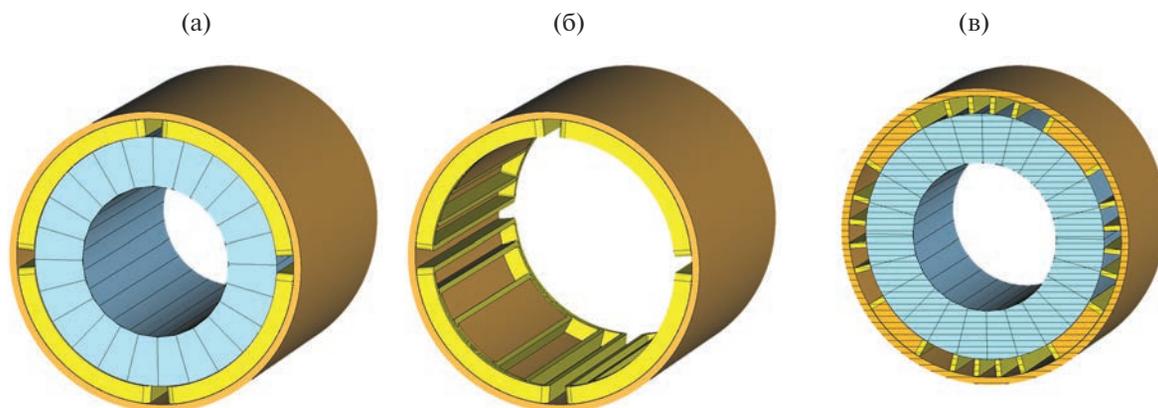
На рис. 4 представлены результаты электромагнитного расчета. Форма кривых распределения градиента суммарного поля и вклада электромагнитного квадрупольного может быть оптимизирована путем подгонки длины, например, магнитотвердого квадрупольного. Различия форм этих распределений невелико. Суперпозиция полей магнитотвердого и электромагнитного квадрупольных возникает благодаря пренебрежимо слабой зависимости магнитного состояния постоянного магнита от внешнего поля электромагнитного квадрупольного. Поэтому оно не реагирует на многократные импульсные воздействия поля электро-

магнитного квадрупольного, хотя и требует предварительной подготовки магнитных элементов магнитотвердого квадрупольного перед сборкой линзы для стабилизации кривых возврата.

Следует отметить, что все элементы электромагнитного квадрупольного в гибридной линзе отодвинуты на значительное расстояние от рабочей области, поэтому дополнительная нелинейность поля, обусловленная вкладом этой линзы, существенно ослаблена [15]. Поэтому, с одной стороны, нелинейность гибрида практически определяется дискретностью магнитотвердого квадрупольного, а с другой, отпадает необходимость применения специальной формы профиля полюсного наконечника – ему можно придать простейшую форму, например, цилиндрическую. При этом повышается эффективность электромагнитного квадрупольного. Действительно (рис. 4б), на реперном радиусе, составляющем 75% от радиуса апертуры, нелинейность поля электромагнитного квадрупольного менее 0.1%.

В гибридном квадрупольном (рис. 5а) электромагнит сделан неявнополюсным. Витки его обмотки установлены так, чтобы зависимость тока от азимутального угла  $\phi$  соответствовала правилу  $\sin 2\phi$  (рис. 5б) [16–19]. Кроме того, в соответствии с выводом, сделанным относительно нелинейности поля электромагнитного квадрупольного при анализе распределения, изображенного на рис. 4б, пространство обмотки вблизи биссектрисы первого (и всех других) квадранта заполнено электротехнической сталью. То есть образованы четыре сердечника, которые вместе с цилиндрической частью магнитопровода существенно повышают эффективность электромагнитного квадрупольного.

В представленной конструкции аналогичного результирующего поля, что и у гибрида (рис. 3), достигают в режиме, когда ток в проводнике составляет до 2.3 кА, а такой же диапазон регулировки поля возможен при токе на-полюс до 6.9 кА. Тогда в проводнике катушки с тремя витками при



**Рис. 5.** Гибрид с неявнополюсным электромагнитом (а), структура его обмотки (б) и разрез (в).

плотности тока 55 А/мм<sup>2</sup> мощность рассеяния 31 кВт. Однако индуктивность такой линзы на два порядка меньше, что позволит сократить фронты импульса тока питания и приблизить его форму к прямоугольной. Кроме того, габаритный размер такой линзы значительно меньше и составляет 140 мм.

Перечень возможных конструкций как электромагнитной, так и магнитотвердой, которые допускают комбинирование в рамках гибридной линзы, не ограничивается указанными выше. В него можно включить также и другие, например, описанные в [20–22], в которых отсутствует ограничение на форму поперечного сечения рабочей области.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В секции DTL линейного ускорителя протонов комплекса DARIA предложено осуществлять фокусировку магнитотвердыми неявнополюсными квадрупольными. Для увеличения срока службы канала линзы будут выполнены из редкоземельного сплава Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>. Рассмотрены условия функционирования линз в ускорителе. С целью компенсации снижения жесткости линзы, возникающего вследствие радиационной деградации намагниченности магнитотвердого материала, предложено использовать гибридную квадрупольную линзу, в которой возможно реализовать глубину перестройки интеграла градиента до 40%. Такая конструкция может реализовать быструю перестройку канала DTL под пучки ионов в небольшом диапазоне отношения массы иона к его заряду. При изменении мультиполярности линзы до единицы можно обеспечить функцию магнитоманипулятора (рис. 1).

### БЛАГОДАРНОСТИ

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.).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlov K.A., Konik P.I., Kovalenko N.A., Subbotina V.V., Pavlova A.E., Grigorev S.V., Kulevoy T.V., Serebrennikov D.A. // *Crystallogr. Rep.* 2022. V. 67. Iss. 1. P. 3. <https://doi.org/10.1134/S1063774522010096>
2. Капчинский И.М. // *Приборы и техника эксперимента.* 1977. Вып. 4. С. 23.

3. Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron, Neutron Tech.* 2019. V. 13. Iss. 6. P. 1126. <https://doi.org/10.1134/S1027451019060399>
4. Герберг А.Н., Мухо С.Б., Рабинович Я.Д., Скачков В.С. // *Приборы и техника эксперимента.* 1980. Вып. 1. С. 49.
5. Kapchinskiy I.M., Skachkov V.S., Kozodaev A.M., Kurakin V.V., Kuybida R.P., Lazarev N.V., Levashova E.A., Preobragenskij A.P., Selin A.V., Vengrov R.M., Zuev V.L. *Drift Tubes for a Focusing Channel of Ion Linear Accelerator* // *Proc. Conf. EPAC-1989.* Chicago, 1989. V. 2. P. 1073.
6. Альтман А.Б., Герберг А.Н., Гладышев П.А. и др. *Постоянные магниты.* Справочник / Ред. Пятин Ю.М. М.: Энергия, 1980. 488 с.
7. Blackmore E.W. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1985. V. NS-32. № 5. P. 3669.
8. Cost J.R., Brown R.D. *Sm-Co Permanent Magnets: Effects of Fast Neutron Irradiation.* Preprint LA-UR-88-4263. Los Alamos, 1988.
9. Drozdovsky A.A. *Induced Radioactivity Decrease Method in High Intensity Linacs* // *Proc. Conf. EPAC 96.* Barcelona, 1996. V. 2. P. 2621.
10. А.с. 662979 (СССР). Многополюсный магнит / ПЯ Р-6927. Рабинович Я.Д. // *Б.И.* 1979. № 18.
11. Halbach K. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1979. V. NS-26. № 3. P. 3882.
12. Скачков В.С. *Магнитотвердые мультиполярные линзы с неявно выраженными полюсами.* Препринт № 76. М.: ИТЭФ, 1979. 34 с.
13. Kantsyrev A., Golubev A., Bogdanov A., Semennikov A., Skachkov V.I., Skachkov Vic., Sergeeva O., Panyushkin V., Varentsov D., Weyrich K., Lang P., Shestov L., Udreia S., Rodionova M., Hoffmann D.H.H. *Development of PMQ Lenses for PRIOR* // *4th Int. Workshop on High Energy Proton Microscopy.* Darmstadt, 2013. [http://www-aix.gsi.de/conferences/HEPM2013/talks/Jul16-1215\\_Kantsyrev.pdf](http://www-aix.gsi.de/conferences/HEPM2013/talks/Jul16-1215_Kantsyrev.pdf)
14. Skachkov V.I., Kozlov A., Kropachev G., Kulevoy T., Liakin D., Sergeeva O., Skachkov Vic., Stasevich Yu., *Quadrupole Focusing Lenses for Heavy Ion Linac* // *Proc. Conf. IPAC-2021.* Campinas, 2021. P. 4359. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB286>
15. Плотников В.К. // *Приборы и техника эксперимента.* 1962. Вып. 2. С. 29.
16. Бадалян Г.В. // *Журн. технической физики.* 1963. Т. 33. Вып. 3. С. 345.
17. Скачков В.С. // *Приборы и техника эксперимента.* 1973. Вып. 5. С. 31.
18. Скачков В.С. // *Приборы и техника эксперимента.* 1974. Вып. 6. С. 32
19. Скачков В.С. *Неявнополюсные мультиполярные линзы с гармоническим распределением плотности тока в обмотке.* Препринт № 178. М.: ИТЭФ, 1984. 41 с.
20. Skachkov V.S. // *J. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2003. V. 500. Iss. 1–3. P. 43. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01991-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01991-5)
21. Skachkov V.S., Ermakov A.N., Shvedunov V.I. // *J. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2004. V. 240. Iss. 1–3. P. 39. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.01.051>
22. Skachkov V.S., Novikov G.A. // *J. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* 2003. V. 526. Iss. 3. P. 199. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.02.019>

## Hybrid Quadrupole Lens for the Focusing Channel of the DARIA Complex

I. V. Kilmetova<sup>1, \*</sup>, A. V. Kozlov<sup>1</sup>, G. N. Kropachev<sup>1, 2</sup>, T. V. Kulevoy<sup>1</sup>, D. A. Liakin<sup>1</sup>, O. S. Sergeeva<sup>1</sup>,  
V. S. Skachkov<sup>1</sup>, Yu. B. Stasevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*NRC “Kurchatov institute”, Moscow, 123182 Russia*

<sup>2</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Moscow, 141980 Dubna*

*\*e-mail: irina.kilmetova@itep.ru*

The results of synthesis and electromagnetic calculation of a hybrid quadrupole lens for a proton linear accelerator of a compact neutron source DARIA are presented. The lens includes a permanent magnet quadrupole with a fixed magnetic field gradient and an auxiliary electromagnetic quadrupole excited by a pulsed current. The permanent magnet quadrupole is made of radiation-resistant rare-earth magnet, and the electromagnetic quadrupole is designed to compensate for permanent magnet magnetization losses resulting from radiation degradation as neutron fluence accumulates during accelerator operation. A hybrid quadrupole lens can be applied for fast adjustment of the focusing channel when accelerating ion beams with different ion mass-to-charge ratios.

**Keywords:** quadrupole, neutron generator, hybrid lens, electromagnetic calculation, ion beam, proton accelerator, electromagnetic lens, permanent magnet quadrupole.