

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



И-498

2882/2-78

P9 - 11422

В.И.Илющенко, А.В.Карпунин, Ю.В.Куликов,  
Г.П.Николаевский

КВАДРУПОЛЬНЫЕ ЛИНЗЫ  
НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ИЗ  $\text{Sm Co}_5$   
(  $G_T = 10,4$  кЭ/см В АПЕРТУРЕ  $0,92 \times 0,98$  см )

**1978**

P9 - 11422

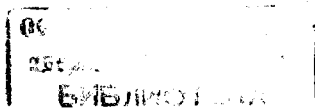
В.И.Илющенко, А.В.Карпунин, Ю.В.Куликов,  
Г.П.Николаевский

КВАДРУПОЛЬНЫЕ ЛИНЗЫ

НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ИЗ  $\text{Sm Co}_5$

(  $G_r = 10,4$  кЭ/см В АПЕРТУРЕ  $0,92 \times 0,98$  см )

*Направлено в ПТЭ*



Илющенко В.И. и др.

P9 - 11422

Квадрупольные линзы на постоянных магнитах из  $\text{SmCo}_5$   
( $G_r = 10,4$  кЭ/см в апертуре  $0,92 \times 0,98$  см<sup>2</sup>)

Разработаны и исследованы две модели квадрупольных линз со стальным ярмом цилиндрической формы. Внешний диаметр ярма равен 8,2 см, ширина ярма - 2,0 см. Полюса линзы изготовлены из  $\text{SmCo}_5$  с энергетическим произведением  $(\text{BH})_{\text{max}} \approx 18$  МГс·Э. Размер полюсов -  $1,6 \times 1,6 \times 0,8$  см<sup>3</sup>. В апертуре  $1,0 \times 1,0$  см<sup>2</sup> получен градиент магнитного поля  $G_r \approx 10$  кЭ/см, в апертуре  $2,0 \times 2,0$  см<sup>2</sup> -  $G_r \approx 5,0$  кЭ/см. Показано, что при переходе к материалам с  $(\text{BH})_{\text{max}} \approx 60$  МГс·Э имеется возможность создать в апертуре 3 см градиент квадрупольного магнитного поля  $G_r \geq 10$  кЭ/см.

Разработанные линзы можно использовать в линейных ускорителях, сепараторах источников поляризованных ионов и прочих подобных устройствах.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Ilyushchenko V.I. et al.

P9 - 11422

Quadrupole Lenses on Stable  $\text{SmCo}_5$  Magnets  
( $G_r = 10.4$  kOe/cm in a  $0.92 \times 0.98$  cm<sup>2</sup> Bore)

Two prototypes of quadrupole lenses with a cylindrical steel yoke have been developed and investigated at the High Energy Laboratory, JINR. The yoke has an outer diameter of 8.2 cm and a width of 2.0 cm. The lens poles were made from  $\text{SmCo}_5$  with an energy product of  $(\text{BH})_{\text{max}} \approx 18$  mG Oe. The pole size was  $1.6 \times 1.6 \times 0.8$  cm<sup>3</sup>. A magnetic field gradient in excess of  $G_r = 10$  Oe/cm was obtained in a  $1.0 \times 1.0$  cm<sup>2</sup> bore and  $G_r = 5.0$  kOe/cm in a  $2.0 \times 2.0$  cm<sup>2</sup> bore. It is possible to realize a quadrupole magnetic field gradient of  $G_r = 10$  kOe/cm in a 3 cm bore using hard magnetic compound with  $(\text{BH})_{\text{max}} \approx 60$  G·Oe. The designed lenses can be used at linear accelerators, polarized ion source separators and other devices.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

## ВВЕДЕНИЕ




В настоящее время для получения магнитных полей различной формы применяются "теплые" электромагниты, сверхпроводящие электромагниты и постоянные магниты. Все действующие ускорители построены на "теплых" электромагнитах, работающих в импульсном или постоянном режимах<sup>/1,2/</sup>. Сверхпроводящие магниты в режиме питания постоянным током используются в линиях транспортировки пучков заряженных частиц<sup>/3/</sup>. Импульсные сверхпроводящие магниты находятся в стадии разработки и в действующих ускорителях не применяются<sup>/4/</sup>.

В последние годы были начаты исследования по использованию постоянных магнитов из магнитно-жестких материалов типа ферритов, сплавов альнико и редкоземельных металлов /РЗМ/<sup>/5/</sup>. В частности, квадрупольные линзы с полюсами из РЗМ предполагается применить в линейных ускорителях<sup>/6,7/</sup>.

В 1977 г. в ЛВЭ ОИЯИ был разработан анализирующий дипольный магнит для ЯМР-магнитометра с полюсами из  $\text{SmCo}_5$ , который обеспечивал максимальное поле  $H = 6500$  Э в зазоре 6 мм и поле  $H = 1540$  Э с неоднородностью  $\Delta H/H \leq 1,5 \cdot 10^{-4}$  в зазоре 13 мм<sup>/8/</sup>. В настоящем сообщении представлены результаты измерений магнитных характеристик квадрупольных линз с полюсами из  $\text{SmCo}_5$  с энергетическим произведением  $(\text{BH})_{\text{max}} \approx 18$  Мгс·Э.

## КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЗ

Магнитно-твердые квадрупольные линзы имели стальное ярмо с внешним диаметром 8,2 см и шириной 2 см. Были изготовлены две модели линз - К1 и К2. В первой модели /рис. 1/ полоса из РЗМ  $1,6 \times 1,6 \times 0,8 \text{ см}^3$  устанавливалась по сторонам квадратной апертуры с  $H_b = 4,0 \text{ см}$ ,

-  — сталь
-  —  $\text{SmCo}_5$
-  — текстолит

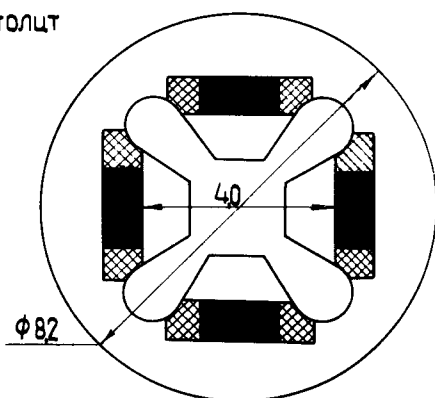


Рис. 1. Модель К1 квадрупольной линзы с полюсами из РЗМ.

во второй модели - с  $H_b \leq 2,0 \text{ см}$ . Кроме этого, модель К1 была испытана с алюминиевым ярмом, а также со стальным ярмом и стальными шунтами вместо боковых текстолитовых вставок. Стальные наконечники ограничивали апертуру с  $H_b = 2,0 \text{ см}$ . Во второй модели помимо варианта с полюсами размером  $1,6 \times 1,6 \times 0,8 \text{ см}^3$ , которые ограничивали апертуру  $2,0 \times 2,0 \text{ см}^2$ , был реализован вариант с дополнительными полюсами и апертурой до  $0,98 \times 0,92 \text{ см}^2$  /рис. 2/. Полюса имели энергетическое произведение  $(BH)_{\text{max}} \approx 18 \text{ Мгс} \cdot \text{Э}$  с разбросом  $\pm 10\%$ .

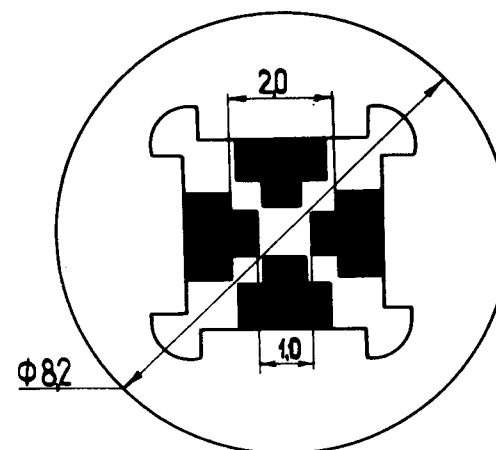


Рис. 2. Модель К2 квадрупольной линзы с полюсами из РЗМ.

Форма полюсов и полюсных наконечников выбрана неоптимальной с точки зрения вклада мультиполей более высокого порядка с  $N = 6, 10, 14$  в основное поле с  $N = 4$ . В дальнейшем предполагается оптимизировать конструкцию линзы таким образом, чтобы, используя магниты минимального объема и заданной формы, получить максимальный градиент  $G_r$  и минимальный вклад гармоник с  $N = 6, 10, 14$  в апертуре заданного размера.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения распределений магнитного поля в радиальном направлении выполнялись с помощью пленочного датчика Холла с размерами чувствительной зоны  $1 \times 3 \text{ мм}^2$ . Датчик располагался во время измерений длинной стороной вдоль оси линзы, что обеспечивало пространственное разрешение на уровне  $1 \text{ мм}$ . Линза и координатно-измерительное устройство приведены на рис. 3. Точность измерений магнитометра с выводом данных на цифровой вольтметр составляла  $\sim 10^{-3}$ .

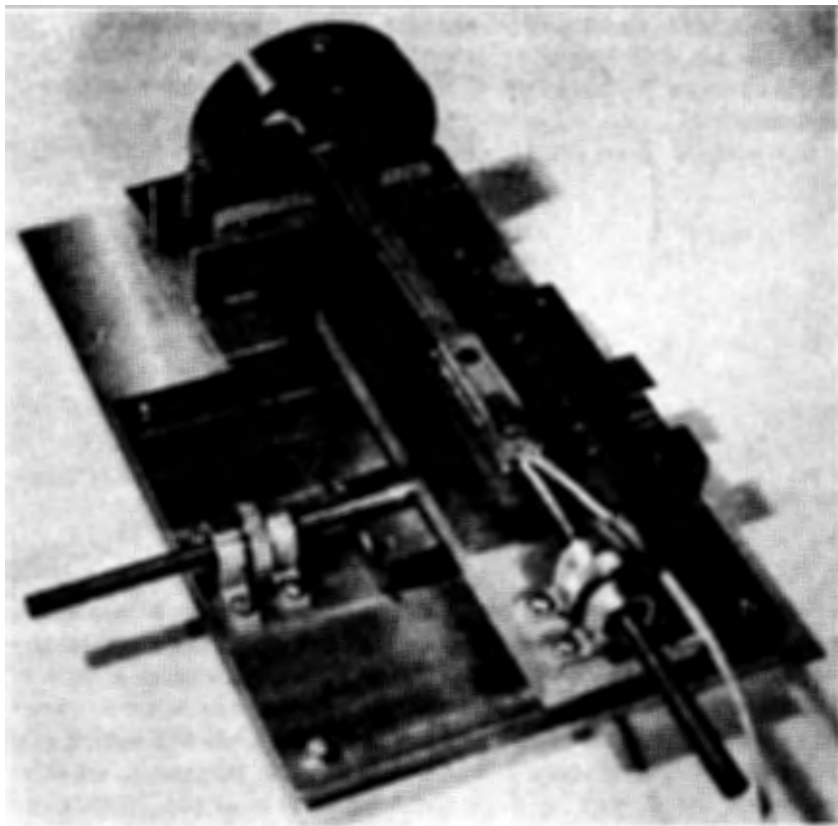


Рис. 3. Внешний вид линзы.

Результаты измерений всех пяти вариантов линз приведены в табл. 1. Предполагалось, что границы апертуры определялись только полюсами из РЗМ, так как железные наконечники не концентрировали магнитный поток.

Максимальный измеренный градиент составил  $G_r = 10,4$  кЭ/см в апертуре  $0,98 \times 0,92$  см<sup>2</sup>. Линейность распределения магнитного поля по радиусу иллюстрируется на рис. 4. Ограничения по измеренным точкам в ра-

диальном направлении связаны с конечными размерами подложки датчика Холла.

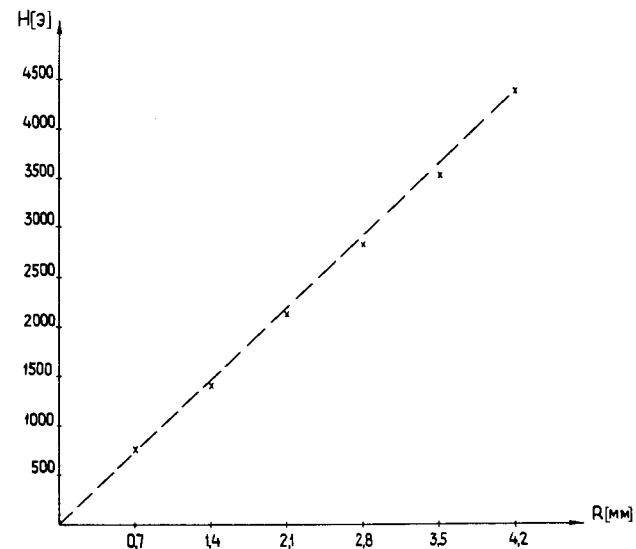


Рис. 4. Распределение магнитного поля в апертуре  $0,98 \times 0,92$  см<sup>2</sup>.

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные значения  $G_r$  в исследованных линзах превышают максимальные градиенты, которые необходимо обеспечивать в линейных ускорителях типа ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ. Линзы подобного класса можно с успехом применять, например, в сепараторе атомного пучка источника поляризованных ионов.

Для обеспечения высокого качества квадрупольного магнитного поля имеется возможность регулировки вклада высоких гармоник с помощью стальных полюсных наконечников и подвижных стальных шунтов и шунтов из РЗМ, которые вводятся в зазоры между полюсами.

Данные, приведенные в табл. 1, следует сравнить с результатами Свенсона и др.<sup>7/</sup>, которые были получены для линз с полюсами из диаметрально намагниченных дисков из РЗМ с  $(BH)_{\max} = 21,6 \text{ МГс} \cdot \text{Э}/\text{см}$ . табл. 2/. Весь диапазон градиентов от 4,7 до 10,4 кЭ/см получен нами в апертурах с  $H_b/2 = /1,0-0,46/ \text{ см}$ .

Таблица 1

Градиенты, измеренные для квадрупольных линз с полюсами из  $\text{SmCo}_5$  с  $(BH)_{\max} = 18 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ .  $H_b$  - размер апертуры,  $H_p$  - толщина полюса.

|                      |                  |                   |      |      |       |
|----------------------|------------------|-------------------|------|------|-------|
| $\frac{H_b}{2}$ [см] | 2,0 <sup>+</sup> | 2,0 <sup>++</sup> | 2,0  | 1,0  | 0,46  |
| $\frac{H_p}{H_b}$    | 0,2              | 0,2               | 0,2  | 0,4  | 1,75  |
| $G_r$ [кЭ/см]        | 0,07             | 0,01              | 0,77 | 4,70 | 10,36 |

+ - ярмо из алюминия.  
++ - ярмо из стали с шунтами.

Таблица 2

Градиенты, измеренные для квадрупольных линз с дисковыми полюсами из  $\text{SmCo}_5$  с  $(BH)_{\max} = 21,6 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ . Радиус полюса  $R_p = 0,964$ , радиус апертуры -  $R_b$ . Внешний диаметр линзы - 8,0 см, ширина ярма - 2,0 см.

|                   |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R_b$ [см]        | 0,964 | 0,838 | 0,741 | 0,665 | 0,602 |
| $\frac{R_p}{R_b}$ | 1     | 1,15  | 1,30  | 1,45  | 1,60  |
| $G_r$ [кЭ/см]     | 6,13  | 7,42  | 8,64  | 10,10 | 11,10 |

Элементарный расчет с учетом коэффициентов заполнения показывает, что увеличение градиента в линзах, разработанных американской группой, объясняется только более высоким значением коэрцитивной силы  $H_c$ .

В квадрупольных линзах, разработанных группой Капчинского, использовались полюса из сплавов альнико с  $(BH)_{\max} = 9 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ <sup>6/</sup>. Максимальный градиент  $G_r = 5 \text{ кЭ/см}$  был получен в апертуре с  $R_b = 1,0 \text{ см}$ . При этом внешний диаметр ярма из стали армо был равен 14,6 см, размер полюса - 3,8x3,2 см<sup>2</sup>.

Наконец, в работе<sup>7/</sup> было проведено сравнение одинаковых по размерам квадруполь с полюсами из сплава ALNICO-V с  $(BH)_{\max} = 5,0 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ , бариевого феррита INDOX-5 с  $(BH)_{\max} = 3,5 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$  и самарий-кобальтового сплава NICOREX-22 с  $(BH)_{\max} = 21,6 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ . В апертуре с  $R_b = 0,6 \text{ см}$  градиенты распределялись следующим образом:  $G_r(\text{ALNICO-V}) : G_r(\text{INDOX-5}) : G_r(\text{NICOREX-22}) = 2,41 : 4,77 : 11,10 \text{ кЭ/см}$ . Из приведенных данных следует, что, во-первых, при сравнимых значениях  $(BH)_{\max}$  у ALNICO-V и INDOX-5 большими значениями  $G_r$  характеризуется материал с более высокой коэрцитивной силой  $H_c$ . Во-вторых, INDOX-5 и NICOREX-22 имеют подобные кривые размагничивания с  $-H_c \approx B_r$ , при этом отношение величин коэрцитивной силы равно 2,44 и отношение градиентов составляет 2,34. В последнем случае можно считать, что оба отношения практически совпадают, т.е. градиент  $G_r$  определяется только величиной  $H_c$  данного материала.

Для качественной оценки вклада железа при использовании стальных магнитопроводов на полюса линзы К2 с  $H_b = 2x1,0 \text{ см}$  наклеивались стальные наконечники толщиной 0,5 см. Несмотря на уменьшение эффективной апертуры до  $H_b = 2x0,5 \text{ см}$ , полученный градиент составил всего 3,7 кЭ/см вместо первоначального 4,7 кЭ/см.

Полученные результаты подтверждают сделанные ранее выводы<sup>5/</sup> о возможности реализации квадрупольных линз с  $G_r \geq 10 \text{ кЭ/см}$  в апертуре с  $2R_b = 3 \text{ см}$  при использовании РЗМ с  $(BH)_{\max} = 60 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ , которые в настоящее время находятся в стадии разработки.

В заключение мы считаем своим приятным долгом поблагодарить И.А.Шелаева за постановку задачи, В.В.Сергеева за предоставление в наше распоряжение магнитов из РЗМ и Д.Свенсона за плодотворные дискуссии по затронутым вопросам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Catalogue of High-Energy Accelerators. SLAC, Stanford, May, 1974.*
2. *Compendium of Linear Accelerators - 1976. AECL-5615, Chalk River, Ontario, Sept., 1976.*
3. *Robins K.E. e.a. IEEE Trans., 1977, NS-24, No. 3, p.1320.*
4. *Byrns R.A. e.a. IEEE Trans., 1977, NS-24, No. 3, p.1325.*
5. *Гречишкин Р.М., Илющенко В.И., Мишин Д.Д. ОИЯИ, 9-10887, Дубна, 1977.*
6. *Капчинский И.М. ПТЭ, 1977, №4, с.23.*
7. *Swenson D.A. e.a. В кн.: Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов, 1977, т.1, с.295.*
8. *Илющенко В.И., Карпунин А.В., Куликов Ю.В. ОИЯИ, 10-10970, Дубна, 1977.*

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 марта 1978 года.