

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С 3933
Г-371

P13 - 7297

3780/2-73

Е.В.Гераскин, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков,
В.Х.Маляев, А.П.Маньч, Г.И.Селиванов

ВЫСОКОГРАДИЕНТНАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ
КВАДРУПОЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ЛИНЗА
С АПЕРТУРОЙ 30 ММ

1973

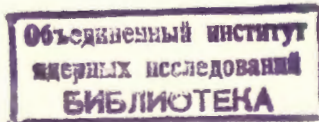
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P13 - 7297

Е.В.Гераскин, В.Г.Гребинник, В.А.Жуков,
В.Х.Маляев,* А.П.Маньч, Г.И.Селиванов*

**ВЫСОКОГРАДИЕНТНАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ
КВАДРУПОЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ЛИНЗА
С АПЕРТУРОЙ 30 ММ**

Направлено в ПТЭ



* Институт физики высоких энергий, Серпухов

В последнее время значительно возрос интерес к гиперонным пучкам, которые могут быть получены на современных ускорителях. В частности, такой пучок уже функционирует на протонном синхроциклотроне в ЦЕРНе^{/1/}.

Поскольку выводимые из ускорителя гипероны имеют высокую энергию /десятки ГэВ/с/ и малые времена жизни $\sim 10^{-10}$ сек/, целесообразно для их фокусировки и транспортировки использовать сверхпроводящую систему из квадрупольных линз, которая при относительно малых поперечных и продольных размерах позволяет создавать высокие градиенты напряженности магнитного поля^{/2/}.

Достаточно корректный расчет такой системы невозможен без знания фокусирующих свойств квадрупольных линз, которые в сильной степени зависят от характеристик используемых сверхпроводящих и магнитных материалов. Поэтому нам представлялось наиболее правильным провести моделирование элемента фокусирующей системы, основываясь на использовании тех материалов, которыми мы располагаем. Кроме того, был найден такой вариант конструктивного исполнения линзы, который является технологически простым и дает возможность прямым суммированием числа элементов получить фокусирующую систему любой протяженности.

Известно, что в апертуре квадрупольной линзы можно с высокой точностью создавать поперечное магнитное поле с постоянным градиентом напряженности, если правильно обеспечить граничные условия. Квадрупольная линза с полюсами, имеющими форму гиперболических цилиндров, и с катушками возбуждения треугольного

сечения является идеальной. Однако создание линзы с полюсами столь сложной конфигурации при высокой требуемой точности изготовления $\pm 0,25$ мм/ сопряжено со значительными техническими трудностями. Конструкция квадрупольной линзы существенно упрощается, если полюсные наконечники изготовить не гиперболической формы, а цилиндрической, а катушки возбуждения - трапецеидального или прямоугольного сечения. Теоретически ^{13/} и экспериментально ^{14/} было показано, что оптимальное значение радиуса закругления полюсного наконечника должно составлять $R = 1,10 - 1,15 a$ /где a - радиус апертуры/ при этом изменение градиента напряженности магнитного поля не будет превышать $\pm 0,2\%$ на расстояниях от оси линзы $r \leq 0,8 a$.

В настоящей работе приводятся результаты испытаний сверхпроводящей магнитной квадрупольной линзы, схематический чертеж которой представлен на рис. 1, а на рис. 2 показано ее поперечное сечение.

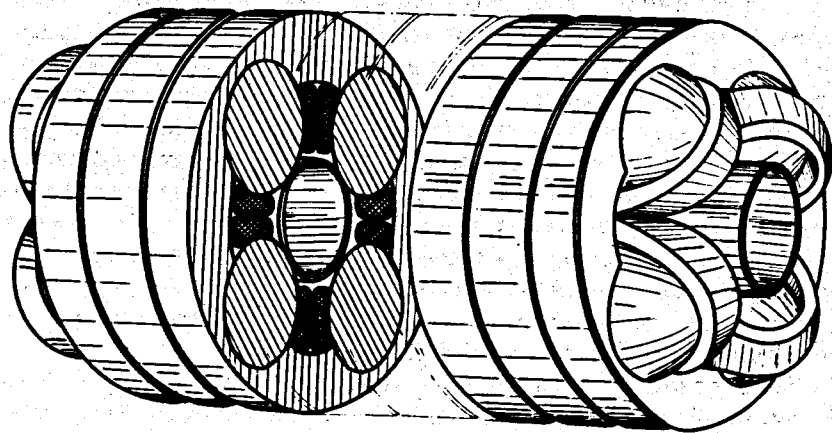


Рис. 1. Сверхпроводящая магнитная квадрупольная линза с апертурой 30 мм.

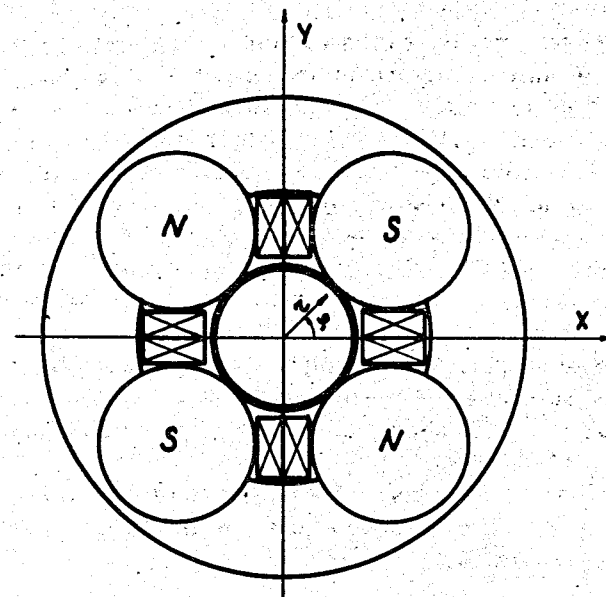


Рис. 2. Поперечное сечение линзы.

Апертура линзы $a = 1,5$ см/ образована полюсными цилиндрическими наконечниками /сталь "Армко"/, имеющими оптимальный расчетный радиус округления 3,45 см. Полная их длина составляет 15 см. Для уменьшения влияния краевых эффектов полюсные наконечники по концам выполнены в виде полусфер. Полюсные наконечники вставлены внутрь сплошного цилиндрического яра /сталь "Армко"/ с внешним диаметром 10,5 см. Как видно из рисунка, в конструкции линзы предусмотрена возможность быстрой смены полюсных наконечников, что обеспечивает проведение исследований ее фокусирующих свойств с помощью полюсных наконечников, выполненных из различных материалов.

Катушки возбуждения изготовлены бескаркасным способом и имеют прямоугольное сечение $1,2 \times 0,6 \text{ см}^2$. Как видно из рис. 1, на краях линзы обмотки возбуждения слегка отгибаются и прижимаются к полюсным наконечникам. В качестве материала для обмотки возбуждения была использована проволока диаметром $0,25 \text{ мм}$ из сверхпроводящего сплава ниобий 50% + цирконий 50% , имеющая критический ток для короткого образца 40 А в поле 40 кГс . Число витков в каждой катушке возбуждения - 320 .

Питание обмоток возбуждения линзы производилось от высокостабильного источника тока с автоматизированной системой ввода-вывода, имеющего нестабильность тока $7 \times 10^{-6} \text{ час}^{-1/5}$.

На рис. 3 дается общий вид квадрупольной магнитной линзы вместе с креплением, подвеской с токоподводящими проводами.

Основные параметры линзы:

Апертура, см	- 3
Внешний диаметр, см	- 10,5
Длина, см	- 15
Плотность тока в обмотке, А/см^2	- $1,34 \times 10^4$
Максимальное поле, кГс	- 16
Максимальный градиент, кГс/см	- 12
Нелинейность градиента в области $r \leq 0,8 \text{ а}$, %	- <1

Учитывая аксиальную симметрию линзы, измерение градиента напряженности магнитного поля в ней удобно выполнять по изменению магнитосопротивления с помощью протяженного датчика, имеющего пренебрежимо малые поперечные размеры. Наиболее подходящими для этой цели являются датчики из висмутовой проволоки с малым поперечным сечением, магнитосопротивление которой при низких температурах хорошо изучено ^[6,7,8].

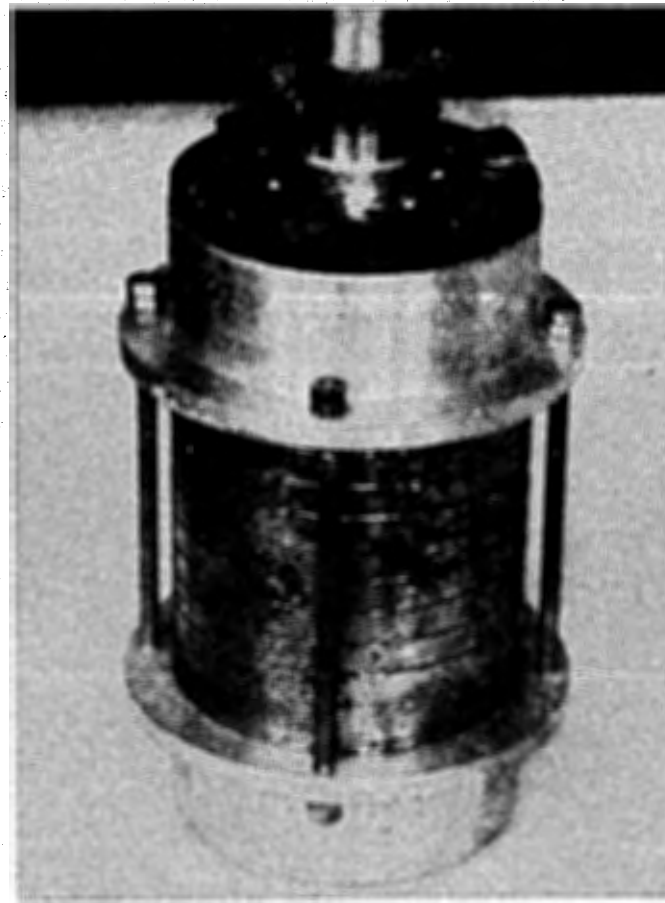


Рис. 3. Общий вид магнитной квадрупольной линзы в сборе.

Для обеспечения удобств проведения измерений был сконструирован специальный магнитометр, измерительная головка которого в разрезе схематически показана на рис. 4. Измерения производились при температуре жидкого гелия. При этом измерительный элемент магнитометра одновременно содержал два датчика - протяженный /рабочий датчик/, предназначенный для изме-

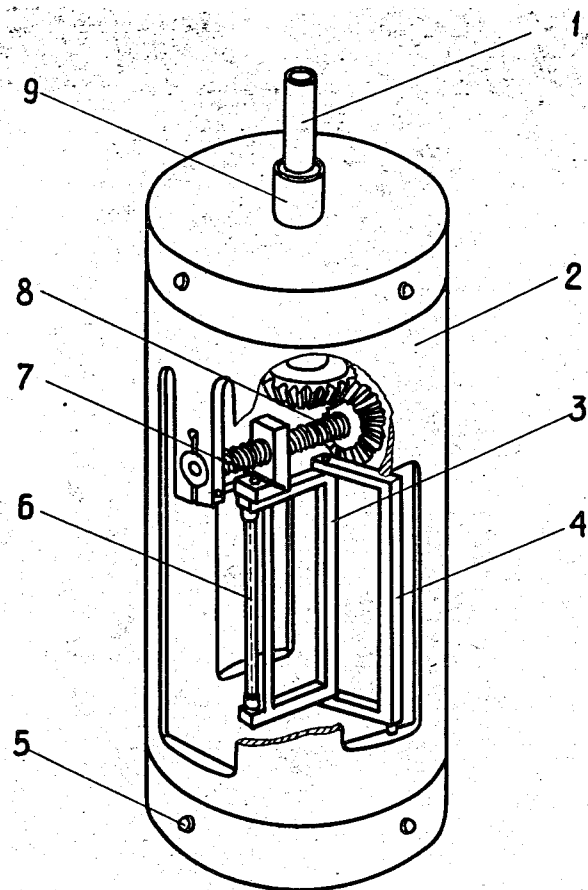


Рис. 4. Механическое устройство для перемещения датчиков магнитного поля в апертуре линзы.

рения градиентов и точечный /опорный/, служивший для градуировки рабочего датчика, а также для проведения непосредственных измерений составляющих напряженности поля H_z в краевой области линзы.

Рабочий датчик был выполнен в виде прямолинейной нити из висмута, заключенной в стеклянную оболочку. Длина нити составляла 32 мм, а диаметр по висмуту -

около 0,02 мм. Опорный датчик имел форму пластинки из висмута размером 1 x 1 x 0,2 мм³. На рис. 5 приведены зависимости сопротивлений обоих датчиков от напряженности магнитного поля при температуре жидкого гелия. Как видно из рисунка, зависимость становится строго линейной в полях, превышающих 2,5 кГс для рабочего датчика и больших 7 кГс - для опорного. Чувствительность рабочего датчика в среднем была приблизительно в 2 раза выше чувствительности опорного датчика и составляла 0,45 мВ/кГс.

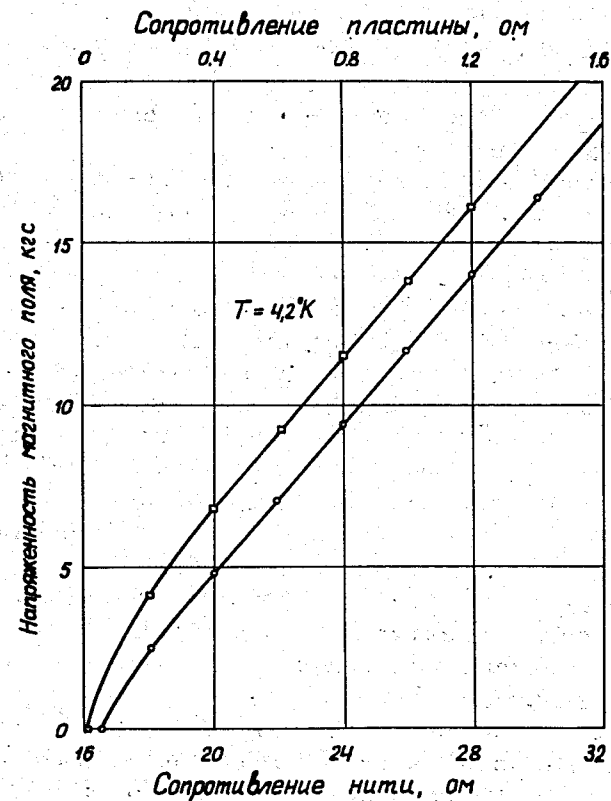


Рис. 5. Зависимость магнитосопротивления датчиков из висмута. о - рабочий датчик /ток 0,5мА/, □ - опорный датчик /ток 10мА/.

Датчики магнитного поля имели три степени свободы, которые обеспечивались с помощью прецизионного механического устройства, основные элементы которого отчетливо видны на рис. 4. По диаметру латунного корпуса /2/ установлен микрометрический винт /8/, по которому перемещается ползун /7/. С ползуном шарнирно связана рамка /3/, несущая датчики магнитного поля /6/. При вращении винта ползун движется по радиусу и перемещает рамку с датчиками. Назначение рамки состоит лишь в сохранении плоскости перемещения датчиков. Так как датчики жестко связаны с ползуном, то при таком движении не происходит разворота датчиков относительно собственной оси и обеспечивается их движение строго в медианной плоскости линзы. Это достигается тем, что рамка с датчиками, в свою очередь, шарнирно связана со второй рамкой, имеющей подвижное крепление в корпусе /2/.

Измерительная головка датчика центрируется в межполюсном пространстве линзы с помощью безлюфтовых точечных опор /5/, расположенных по краям корпуса /2/. Все люфты в подвижных соединениях отдельных элементов измерительной головки выбраны пружинными растяжками. Микрометрический винт через пару конических шестерен связан с вертикальным трубчатым приводом /1/, на конце которого в теплой зоне имеется отсчетное устройство. Перемещение головки магнитометра в осевом направлении осуществляется с помощью реечного механизма, жестко связанного с полым вертикальным штоком /9/, а в азимутальном направлении - поворотом всего механизма в целом.

Точность, с которой рамка с датчиками может быть установлена в апертуре квадрупольной линзы, составляет для радиального направления 0,01 мм, осевого - 0,5 мм и азимутального - 2°.

Измеренное значение максимальной напряженности магнитного поля в апертуре линзы в зависимости от тока возбуждения представлено на рис. 6. При увеличении тока свыше 20А начинается насыщение полюсных наконечников, и зависимость напряженности поля, а, следовательно, и градиента, от тока возбуждения приобре-

тает нелинейный характер. При наибольшем токе в обмотке - 40А величина напряженности поля вблизи полюсного наконечника составляет ~ 17 кГс.

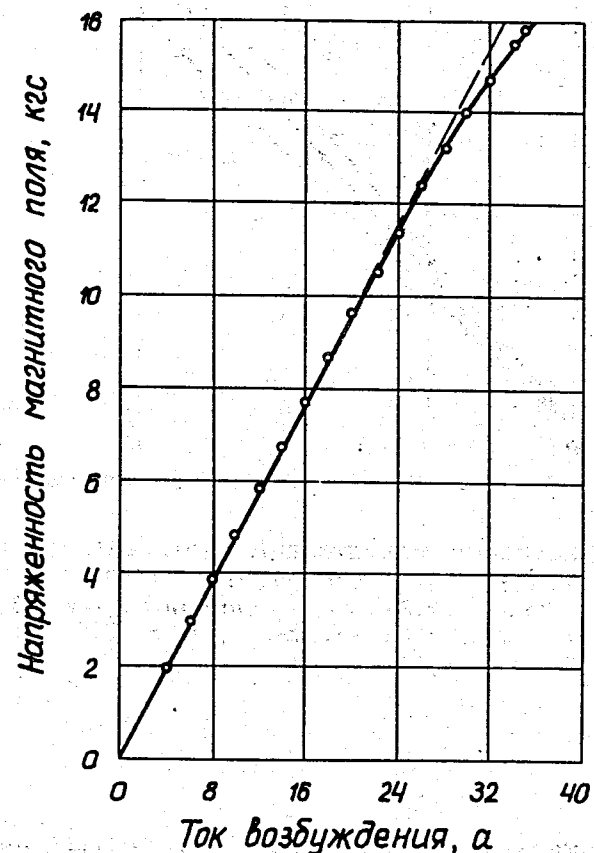


Рис. 6. Зависимость максимальной напряженности магнитного поля в апертуре линзы от тока возбуждения / $r = 1,4$ см, плоскость $x=y$ /.

Распределение составляющих напряженности магнитного поля по радиусу апертуры при значениях токов возбуждения 30 и 35А дается на рис. 7. Как видно из

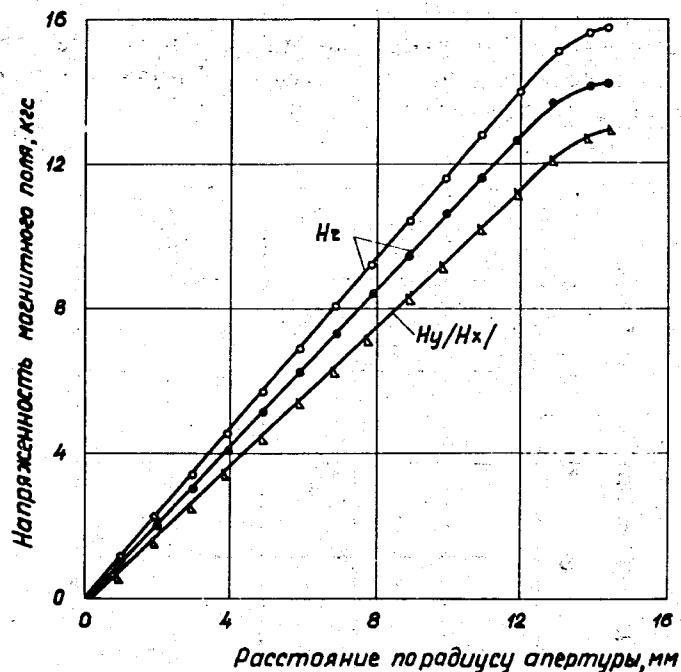


Рис. 7. Изменение напряженности магнитного поля по радиусу апертуры. \circ - ток возбуждения $I_{в} = 35$ а, градиент в центре $g_0 = 12,3$ кГс/см, плоскость $x=y$; \bullet - $I_{в} = 30$ В, $g_0 = 11,2$ кГс/см, $x=y$; Δ - $I_{в} = 30$ А, $g_0 = 10$ кГс/см, x ($y=0$).

рисунка, линейная зависимость составляющих поля имеет место вплоть до значения радиуса $r = 1,2$ см. Измеренная величина нелинейности поля при $r \leq 1,2$ см не превышает 0,2%. При больших значениях радиуса нелинейность резко возрастает и на границе апертуры имеет значительную величину.

Значения градиента магнитного поля в плоскостях фокусировки и дефокусировки равны. Так, при токе возбуждения 30 А оно составляет 10 кГс/см. Ожидает-

мая величина градиента в этих плоскостях должна составлять приблизительно 12 кГс/см при токе возбуждения 40 А. Градиент в диагональной плоскости $x=y$ приблизительно на 12% выше, чем в фокусирующей плоскости, и при токах 30 и 35 А составляет соответственно 11,2 и 12,3 кГс/см.

На рис. 8 приведены кривые распределения напряженности магнитного поля $H_r(z)$ в диагональной плоскости при двух значениях расстояния от оси квадрупольной линзы $r = 5,6; 10,8$ мм. Как видно из рисунка,

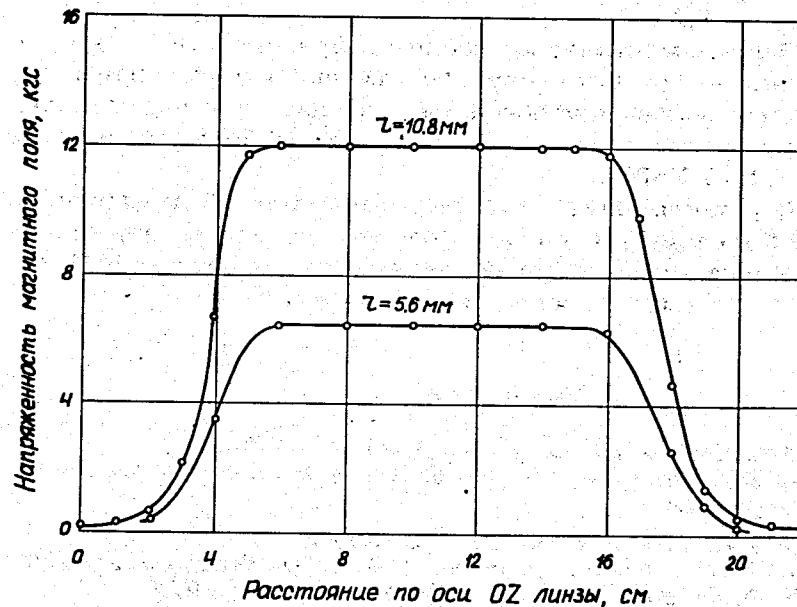


Рис. 8. Изменение напряженности магнитного поля по оси линзы /плоскость $x=y$ /.

характер этих кривых остается неизменным: в центральной части имеется плато протяженностью ~ 10 см, а затем поле резко спадает. Форма кривых близка к составному колоколу, поэтому эффективная длина такой линзы хорошо описывается выражением^{19/}:

$$L = 2z_k + \frac{1}{2} \pi d,$$

где $2z_k$ - длина плато, d - коэффициент, обеспечивающий наилучшее совпадение экспериментальной и расчетной зависимостей $H_r(z)$.

Подставляя $z_k = 5$ см и $d = 3,5$ см, находим, что эффективная длина линзы равна 15,5 см.

Полученные результаты по моделированию фокусирующего элемента квадрупольной линзы позволяют сделать вывод, что выбранный нами вариант исполнения является не только технологически простым, но и обеспечивает высокое значение градиента магнитного поля ~ 12 кГс/см/с однородностью не хуже 1% при полезной апертуре радиуса 1,2 см.

Экспериментальные данные, приведенные нами в статье, могут быть непосредственно использованы при проектировании протяженной системы для фокусировки и транспортировки гиперонных пучков большой энергии /10 - 100 ГэВ/с/.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.Ф.Киселеву за предоставление на время измерений источника тока с высокой стабильностью, а также Е.Н.Русакову за высокое качество выполненных работ.

Литература

1. M.Marquet and M.Morpurgo. *Cryogenics*, 11, 412, 1971.
2. R.J.Stefanski. *Hyperon Beam with Quadrupole Focusing*. NAL, FN-239, 1971.
3. И.А.Шукейло. *ЖТФ*, 29, 1225, 1959.
4. J.E.Dayton, F.C.Shoemaker and R.F.Mozley. *Rev.Sc.Instr.*, 25, 485, 1954.
5. Ю.Ф.Киселев. *ОИЯИ, Р13-6231*, Дубна, 1972.
6. G.K.T.Conn, B.Donovan, *J.Sci.Instr.*, 28, 7, 1971.
7. M.S.Lubell and B.S.Chandrasekhar. *Rev.Sci.Instr.*, 35, 906, 1964.
8. M.W.Doyley. *Rec.Sci.Instr.*, 33, 1290, 1962.
9. С.Я.Явор. *Атомиздат, Москва, 1968*.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 июля 1973 года.