

10066

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10066

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАДА

8 - 10066

Л.Л.Зиновьева, Д.Кабат, В.М.Лачинов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНоиДА
С ВЫСОКОЙ ОДНОРОДНОСТЬЮ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1976

8 - 10066

Л.Л.Зиновьева, Д.Кабат,* В.М.Лачинов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА
С ВЫСОКОЙ ОДНОРОДНОСТЬЮ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Направлено в Чехословацкий электротехнический
журнал

О И И
БИБЛИОТЕКА

* Электротехнический институт Словацкой академии наук, Братислава, ЧССР.

1. Введение

Создание в Отделе новых методов ускорения усовершенствованной магнитометрической аппаратуры широкого назначения для измерения на коллективном ускорителе заряженных частиц ставит высокие требования к средствам ее настройки. Так, для проверки и калибровки различных магнитометров необходимо опорное магнитное поле до $\sim 5\div 6$ Т с однородностью $\sim 10^{-5}$ в объеме 100 см^3 и временной стабильностью $\sim 10^{-5}$ 1/час. В качестве такого источника магнитного поля естественно выбрать сверхпроводящий соленоид /СПС/, который может обеспечить указанные выше требования и имеет безусловное преимущество перед источниками других типов. Высокая временная стабильность магнитного поля достигается закорачиванием обмотки СПС сверхпроводящей перемычкой. Обеспечение комнатной температуры ~ 300 К для калибруемых магнитометрических датчиков в рабочем поле достигается использованием т.н. антикриостата, который помещается во внутреннем объеме СПС.

В рабочем объеме СПС цилиндрической формы с радиусом 40 мм и такой же высотой должна быть достигнута индукция магнитного поля до 6 Т при однородности поля $\Delta B/B_0$ до 10^{-5} . С учетом требуемого диаметра рабочего "теплого" объема СПС и конструкции антикриостата и каркаса определяется внутренний диаметр обмотки СПС $2a_1=120$ мм. Поскольку стоимость сверхпроводящего кабеля высока, то желательно, чтобы обмотка СПС имела минимальный объем.

Целью настоящей работы является проведение первого этапа проекта создания сверхпроводящего соленоида с теплым однородным полем /СПСТОП/ - выбор и расчет обмотки СПС.

2. Способы расчета СПС с высокой однородностью магнитного поля

Обычно такие СПС выполняются в форме цилиндрических катушек с корректирующими обмотками, находящимися на наружной поверхности катушек ¹⁻³. Плотность тока во всем объеме обмотки предполагается одинаковой. Размеры соленоида такой формы могут быть оптимизированы ¹ с точки зрения минимального расхода сверхпроводника. Условие высокой однородности поля при этом задается как однородность 6-й степени согласно теории и терминологии Гарретта ⁴. Предложен метод оптимизации СПС цилиндрической формы с пониженной плотностью тока в средней части обмотки ⁵. Разработаны численные методы расчета размеров обмотки соленоидов для создания поля заданной однородности ⁶⁻⁹.

Критический ток I_c СПС с постоянной плотностью тока во всем объеме обмотки определяется максимальным значением индукции магнитного поля в обмотке B^{\max} . В местах, где $B < B^{\max}$, сверхпроводник загружен неполностью. Степень его загрузки зависит от распределения поля в обмотке и от $(I_c - B)$ -характеристики сверхпроводящего кабеля /СПК/. Разработан способ создания магнитного поля с высокой однородностью в СПС, разделенном на цилиндрические секции с различной средней плотностью тока ¹⁰. В этом случае сверхпроводящий кабель загружен более равномерно, чем в соленоиде с одинаковой плотностью тока во всем объеме обмотки. В результате достигается меньший расход СПК.

3. Выбор формы обмотки СПС

С точки зрения минимизации расхода СПК разделим обмотку СПС на цилиндрические секции. Получение различных средних плотностей тока λ_j в секциях СПС с высокой однородностью поля достигается намоткой секций СПК различного сечения, соединением секций последовательно и питанием их от одного источника тока. В этом случае требуется только одна сверхпроводящая перемычка /ключ/ для получения режима стабильного "замороженного" магнитного поля.

Обмотка соленоида /рис. 1/ состоит из двух частей - основной и корректирующей. Основная разделена

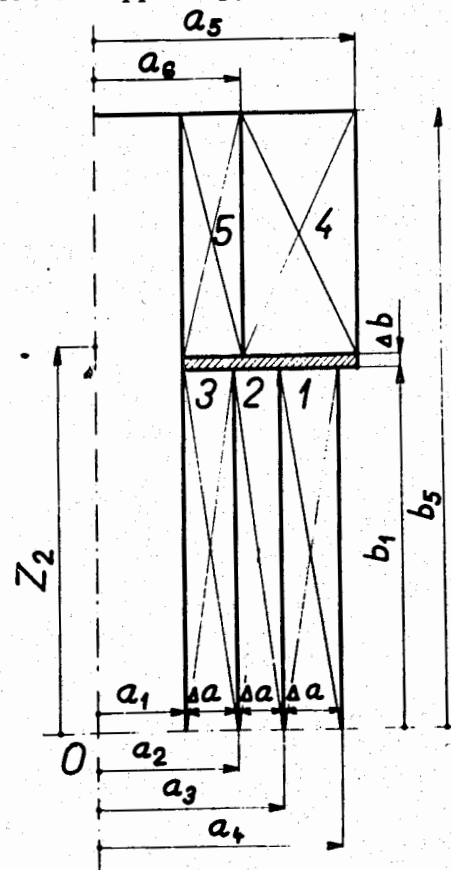


Рис. 1. Форма обмотки соленоида.

на 3 цилиндрические секции. В этом случае конструкция ее достаточно проста, а уровень индукции в центре соленоида может быть повышен до ~60% от максимально возможного при бесконечном количестве секций /10/. Чтобы деление основной обмотки имело смысл, необходимо соблюдение следующих условий:

а/ объем СПК в основной обмотке должен быть больше или, по крайней мере, равен объему СПК в корректирующей обмотке;

б/ критические токи во всех секциях должны быть одинаковы или близки к критическому току СПС.

Условие а/ выполняется тем лучше, чем будет выше плотность тока в корректирующей обмотке. Вследствие высокой однородности поля в СПС максимальное значение индукции на внутренней поверхности корректирующей обмотки близко к значению индукции в центре соленоида. Условия а/ и б/ можно выполнить путем разделения корректирующей обмотки на две цилиндрические секции. Из практических соображений /минимальный набор СПК различного сечения/ для намотки секций корректирующей обмотки выбраны СПК, которые применены для внутренней и наружной секций основной обмотки.

4. Выбор сверхпроводниковых кабелей

При выборе сечений СПК исходим из условия равномерной их загрузки по секциям обмоток. СПК загружены оптимально тогда, когда критический ток соленоида $I_{сМ}$ равен критическим токам всех секций $I_{сМ} = I_{сн}$, для $n=1 \div N$. Предполагаем, что плотность тока в каждой секции $\lambda_{jn} = I_M / S_n$ равномерно распределена по ее сечению, а S_n - сечение одного витка в обмотке "n"-ой секции /эффективное сечение СПК/. Коэффициент заполнения обмотки λ определяется принятой технологией намотки. Предполагается обеспечить плотную намотку без каналов для охлаждения с натягом СПК при намотке до $10 \text{ кг/мм}^2 / \epsilon = 0,3 \div 0,4\% / 10/$. Для междуслойной изоляции используется два слоя лавсановой пленки толщиной 50 мкм. В этом случае для круглого сечения

СПК, опираясь на имеющийся опыт /10/, считаем, что коэффициент заполнения обмотки $\lambda = 55 \div 65\%$. На основе проведенных нами измерений зависимость λj_c от B_1 для ниобий-титановых кабелей НТ-50 при 4,2 К в поле $5 \div 7 \text{ Т}$ можно выразить в форме:

$$\lambda j_c = (7,7 - 0,7B) 10^8 \text{ [A/м}^2 \text{, Т]}.$$

Диаметр СПК внутренней секции основной обмотки (n=3) выбран равным 1,0 мм, чтобы ограничить ток питания в пределах до ~200 А. Эффективное сечение этого СПК считаем равным $S_3 = 1,37 \text{ мм}^2$. По /1/ из равенства критических токов определяются значения S_n в остальных секциях основной обмотки:

$$S_{n-1} = \frac{1}{1 + 0,7 \cdot 10^8 k_{jn}} S_n, \quad /2/$$

где $0,7 \cdot 10^8 \text{ [A/(м}^2\text{Т)]} = |\partial \lambda j_c / \partial B|_{B=CT}$.

$$k_{jn} = a_{1n} F(a_n, \beta_n) = a_{1n} \mu_0 \beta_n \rho_n \frac{a_n + \sqrt{a_n^2 + \beta_n^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta_n^2}} \quad /3/$$

- вспомогательная величина n-й секции. $F(a_n, \beta_n)$ - фактор обмотки, $a_n = a_{2n} / a_{1n}$ и $\beta_n = b_n / a_{1n}$ - относительные размеры / $2a_{1n}$ - внутренний диаметр, $2a_{2n}$ - наружный диаметр, $2b_n$ - высота обмотки n-ой секции/.

Индукцию в центре соленоида, который разделен на N цилиндрических коаксиальных секций, можно вычислить по формуле:

$$B_{ocN}^{max} = \frac{7,7 \cdot 10^8}{0,7 \cdot 10^8} \left[1 - \frac{1}{(1 + 0,7 \cdot 10^8 k_{jn})^N} \right], \quad /4/$$

где $7,7 \cdot 10^8$ и $0,7 \cdot 10^8$ - параметры $(\lambda j_c - B)$ характеристики СПК /1/. Индекс "max" величины B_{ocN} обозначает, что величина k_{jn} для всех секций одинакова /условие достижения максимальной индукции в центре соленоида /10/. Из ур. /4/ при $N=3$ для $B_{oc3}^{max} = 6 \text{ Т}$ получим

$I + 0,7 \cdot 10^8 \cdot k_j = 1,3$. Применяв /2/, найдем: $S_2 = 1,05 \text{ мм}^2$ и $S_1 = 0,81 \text{ мм}^2$.

Учитывая приведенные расчеты и размеры выпускаемых промышленностью СПК, мы выбрали для разных секций основной обмотки СПК с диаметрами 1,0; 0,85; 0,70 мм. Их $(I_c - B)$ -характеристики /по заводским данным/ приведены на рис. 2. Используя экспериментальные данные /10/, считаем, что эффективные сечения этих СПК равны - $S_1 = 0,65 \text{ мм}^2$, $S_2 = 0,90 \text{ мм}^2$, $S_3 = 1,37 \text{ мм}^2$.

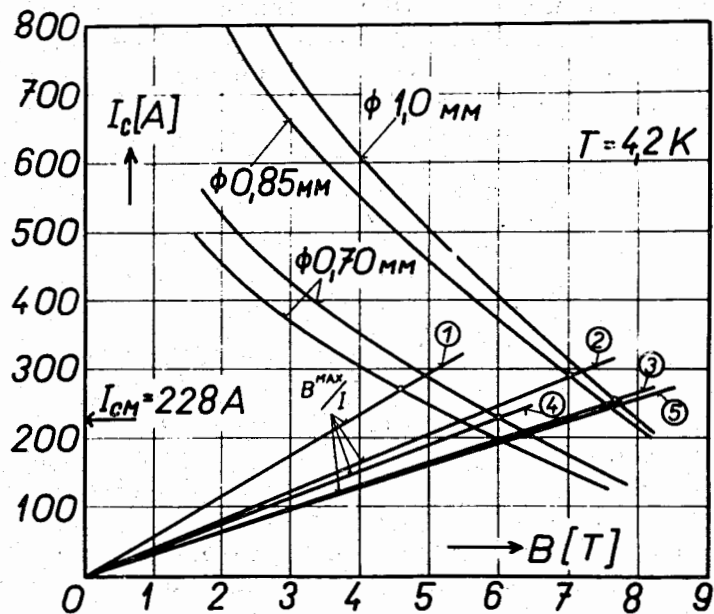


Рис. 2. $(I_c - B)$ - характеристики сверхпроводников и значения величины B^{max}/I для секций обмотки соленоида.

5. Определение размеров обмотки СПС

Необходимо определить размеры основной / a_2, a_3, a_4, b_1 - рис. 1/ и корректирующей / a_5, a_6, b_5 / обмоток. Внутренний диаметр СПС выбран ранее $2a_1 = 120 \text{ мм}$.

Ширина ребра каркаса - $\Delta b = 3 \text{ мм}$ /рис. 1/. Задачу определения размеров обмотки СПС можно математически упростить, выбирая толщины секций основной обмотки одинаковыми, $\Delta a = \text{const}$. С учетом $(\lambda_j, c - B)$ -характеристики СПК /1/ можно показать /10/, что для высоты обмотки соленоида $2 \geq 200 \text{ мм}$ в центре его достигается индукция B_{oc3} только на $\sim 0,01\%$ меньше по сравнению с B_{oc3}^{max} . При расчете предполагаем отсутствие ферромагнитных элементов в конструкции СПС и считаем среду линейной, что позволяет применять принцип суперпозиции.

На первом этапе расчета исходим из теории Гарретта /4/ - условие однородности поля задаем как однородность 6-й степени. Кроме того, задаем дополнительное требование однородности поля на определенном участке оси соленоида. При этом предполагаем, что корректирующая обмотка не разделена на секции и намотана сверхпроводящим кабелем, как и наружная секция основной обмотки. В таком случае нужно определить 4 неизвестных $\Delta a, b_1, a_5, b_5$ /размеры односекционной корректирующей обмотки со штрихами/. Для определения их составим следующую систему из 4 уравнений:

$$B_{oc} = \sum_{n=1}^N \Delta B_{ocn} = a_1 \sum_{n=1}^N \lambda_j c_n F(\alpha_n, \beta_n)$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_j c_n E_2(\alpha_n, \beta_n) F(\alpha_n, \beta_n) = 0$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_j c_n E_4(\alpha_n, \beta_n) F(\alpha_n, \beta_n) = 0$$

$$\sum_{n=1}^N \lambda_j c_n [(\beta_n - \xi_2) G(\alpha_n, \beta_n - \xi_2) + (\beta_n + \xi_2) G(\alpha_n, \beta_n + \xi_2)] =$$

$$2 \sum_{n=1}^N \lambda_j c_n \beta_n G(\alpha_n, \beta_n)$$

$$= \frac{B}{B_0} \left| z_2 \right.$$

В системе /5/ индексом "п" обозначаем фиктивные катушки, которыми при расчете заменяем реальную обмотку соленоида, $a = a_2/a_1$ и $\beta = b/a_1$ - относительные размеры фиктивных катушек, $F(a, \beta)$ - коэффициент формы /см. /3/; $E_2(a, \beta)$ и $E_4(a, \beta)$ - коэффициенты степенного ряда /см., напр., /11/ /; $\xi_2 = z_2/a_1$, где $2z_2$ - длина участка оси соленоида, на котором задано дополнительное требование однородности поля V/V_0 . Символом $G(a, \beta)$ обозначено выражение:

$$G(a, \beta) = F(a, \beta) / (\mu_0 \beta). \quad /6/$$

Дополнительное требование однородности поля: $V/V_0 = 1\%$ на участке оси длиной $z_2 = \pm 120$ мм. Для $z_2 > 120$ мм для заданных величин система уравнений /5/ не имеет решений.

Размеры основной обмотки ($\lambda a, b_1$), полученные в результате первого этапа расчета, фиксируем, а оптимальные размеры корректирующей обмотки a_5, a_6, b_5 - рис. 1/ - определим следующим образом:

Для заданного заранее множества величин размеров b_5 и a_6 размер a_5 определим методом, описанным в /7/, так, чтобы в заданном пространстве $Z = \pm 20$ мм и $R = \pm 40$ мм была получена наилучшая однородность поля, т.е. так, чтобы $|\Delta V/V_0|^{\max} \rightarrow \min$.

6. Результаты расчета

В результате первого этапа расчета получено: $\lambda a = 6,715$ мм и $b_1 = 169,67$ мм.

На втором этапе проведены расчеты для величины b_5 в интервале 190 ÷ 220 мм и для величины a_6 в интервале 60 ÷ 110 мм. В результате для каждого значения размера b_5 определены оптимальные размеры a_6 и a_5 так, чтобы $|\Delta V/V_0|^{\max} \rightarrow \min$ /рис. 3/. На рис. 4 приведены значения $|\Delta V/V_0|^{\max}$ в зависимости от размера b_5 для оптимальных размеров a_6 и a_5 . С увеличением размера b_5 увеличивается и объем обмотки соленоида V - см. рис. 5. На основе приведенных

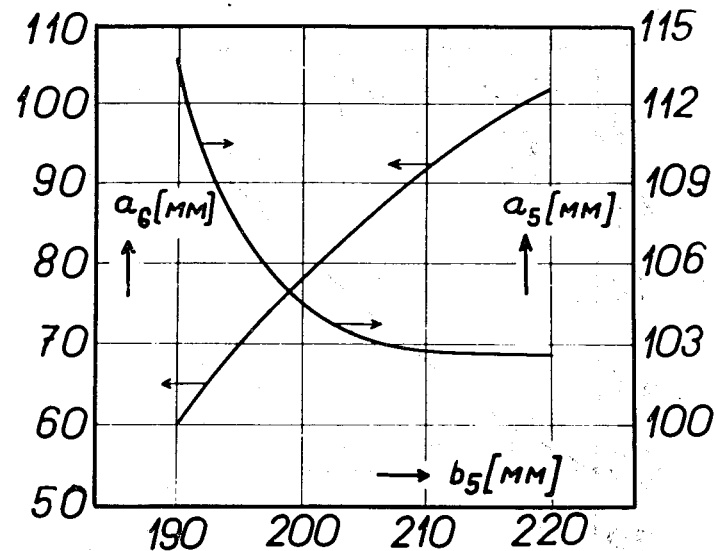


Рис. 3. Оптимальные с точки зрения однородности поля размеры a_6 и a_5 в зависимости от размера b_5 .

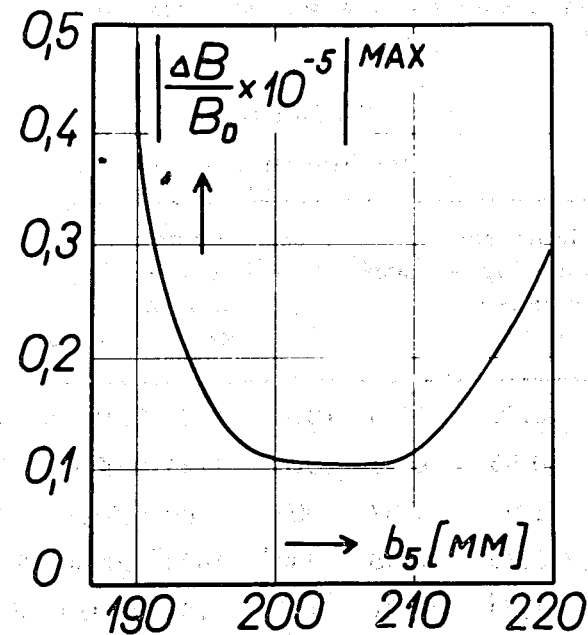


Рис. 4. Значения $|\Delta V/V_0|^{\max}$ в зависимости от размера b_5 .

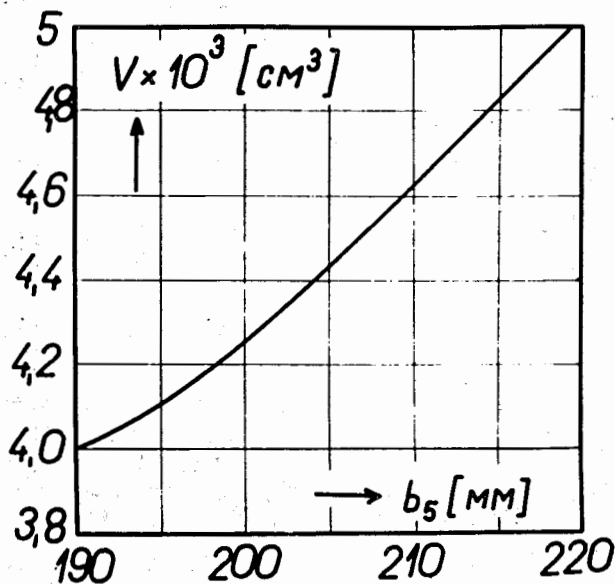


Рис. 5. Зависимость объема обмотки соленоида V от размера b_5 .

Таблица
Параметры секций

Секция	Диаметр сверхпроводника (мм)	S [мм ²]	V [см ³]	Длина сверхпроводника м	B^{\max}/I [Т/А]	I_c [А]	η [%]
1	0,70	0,65	1074	1651	0,01745	267	85,4
2	0,85	0,90	1010	1121	0,0251	287	79,5
3	1,0	1,37	904	660	0,0306	255	89,4
4	0,70	0,65	932*	1432*	0,0265	228	100,0
5	1,00	1,37	181*	132*	0,0314	250	91,2

* Величины приведены для двух секций /верхней и нижней/

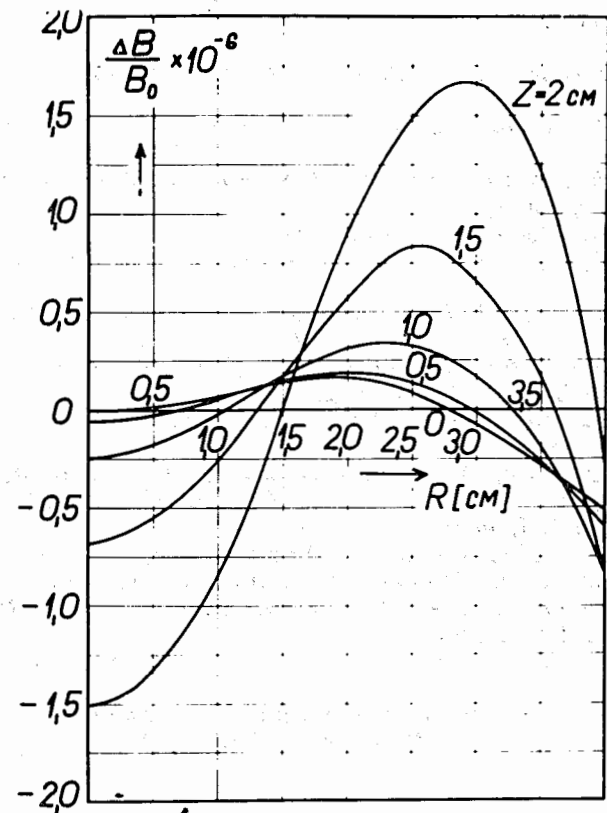


Рис. 6. Зависимость $\Delta B/B_0$ в радиальном направлении R для значений $Z = 0,5; 5; 10; 15$ и 20 мм.

зависимостей /рис. 3-5/ выбран вариант с $b_5 = 195$ мм. Размеры $a_6 = 107,4$ мм и $a_5 = 70,0$ мм.

Расчетная однородность поля в единицах $\Delta B/B_0 \times 10^{-6}$ в зависимости от размера R для $Z = 0,5; 10; 15$ и 20 мм представлена на рис. 6. На рис. 2 изображены линии B^{\max}/I секций. Критический ток соленоида /без учета возможной деградации/ определен критическим током наружной секции корректирующей обмотки: $I_{cm} = 228$ А. Индукция в центре соленоида при I_{cm} достигает $B_{oc} = 6,8$ Т. Загрузка с СПК $\eta_n = I_{cm}/I_{cn}$ приведено вместе с остальными параметрами соленоида в таблице. Объем обмотки соленоида $V \sim 4100$ см³, коэффициент $V/a^3 \sim 19$.

Литература

1. B. Girard, M. Sauzade. Nucl. Instr. Meth., 1964, 25, 269.
2. J. Jelinek, I. Dolezal. Czechoslovak Journ. Phys., sec. A, 1972, 22, 331.
3. L. Cesnak, D. Kabát, J. Kokavec, L. Krempaský. Elektrotechnický obzor, 1975, 64, 1, 3.
4. M. W. Garrett. Journ. Appl. Phys., 1951, 22, 1091.
5. L. Cesnak, D. Kabát. Journ. Phys. E: Scient. Instr., 1972, 5, 944.
6. Е. П. Жидков, Л. Л. Зиновьева, Н. Б. Рубин. Сообщение ОИЯИ, Р9-7580, Дубна, 1973.
7. Л. Александров, Е. П. Жидков, Л. Л. Зиновьева. Сообщение ОИЯИ, Р11-8059, Дубна, 1973.
8. С. Ю. Клименко, В. К. Ожогина, Препринт ИАЭ, 2511, Москва, 1975.
9. В. И. Курочкин, В. П. Набережных, В. В. Пермяков, В. А. Ядрошников, А. А. Удод. Журнал технической физики, 1975, том XLV, вып. 5, 943.
10. Д. Кабат. Диссертация, Братислава, ЧССР, 1975.
11. Д. Монтгомери. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. пер. с англ. изд. Наука, Москва, 1971, 265.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 августа 1976 года.