

4996/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



13/xII-76

8 - 10001

К-12

Д.Кабат, Г.П.Цвинева, Ю.А.Шишов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА  
С ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ  $\sim 1$  МДж

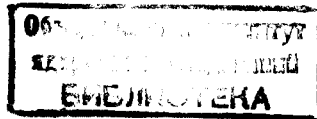
**1976**

8 - 10001

Д.Кабат,\* Г.П.Цвинева, Ю.А.Шишов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА  
С ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ  $\sim 1$  МДж

Направлено в журнал "Electrotechniky  
casopis "



---

\* Электротехнический институт Словацкой академии наук, Братислава, ЧССР.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с разработкой сверхпроводящих магнитов для ускорительного комплекса "Нуклотрон" /1/ возник ряд задач, а именно:

а) Изучение свойств сверхпроводящих кабелей различных конструкций, предназначенных для намотки дипольных и квадрупольных магнитов, как импульсных, так и постоянноточных.

б) Исследование способов эвакуации энергии из вышеуказанных сверхпроводящих магнитов в случае их перехода в нормальное состояние.

Для решения этих задач решено создать секционированный соленоид (см. рис. 1), основные параметры которого близки параметрам дипольных магнитов "Нуклотрона":

а) Номинальный ток  $I_{\text{НОМ}} = 2500 \text{ А}$  /1/

б) Максимальная индукция в обмотке  $B^{\text{max}} = 4,65 \text{ Т}$  при  $I_{\text{НОМ}} = 2500 \text{ А}$ , поскольку резерв в токе соленоида  $I_{\text{с}}/I_{\text{НОМ}} = 1,1$  /2,4/.

в). Максимальная по времени цикла индукция магнитного поля в апертуре дипольных магнитов  $B_0 = 4,5 \text{ Т}$  при  $I_{\text{НОМ}} = 2500 \text{ А}$ , а отношение максимальной индукции в обмотке дипольных магнитов к величине  $B_0$ ,  $B^{\text{max}}/B_0 \approx 1,04$  /2/.

г) Сверхпроводник - ниобий-титановый сплав с критической плотностью тока в поле  $\sim 5 \text{ Т}$  при  $4,2 \text{ К}$   $\sim 1,1 \times 10^5 \text{ А/см}^2$  /3,4/. Коэффициент заполнения проводников, из которых будет изготовлен кабель, равен 40%, их наружный диаметр - 0,5 мм. Кабель, пред-

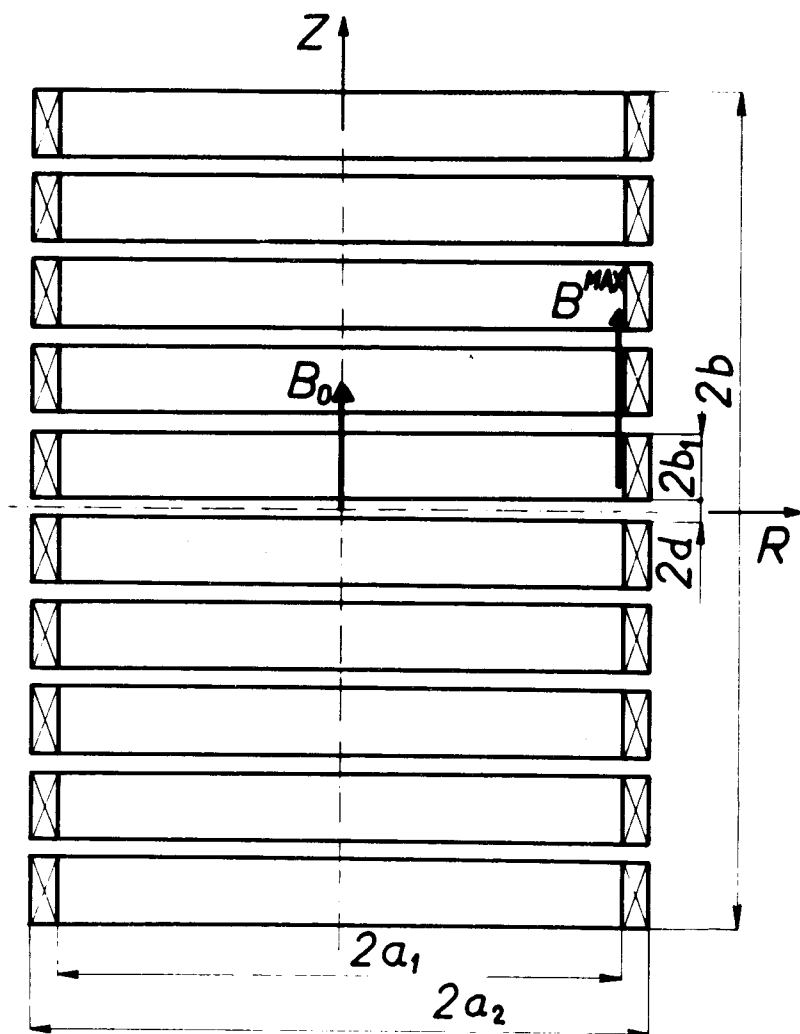


Рис. 1. Конфигурация обмотки соленоида.

назначенный для  $I_C = 1,1 \times I_{\text{НОМ}} = 2750 \text{ А}$  в поле  $5,1 \text{ Т}$  в одном из предполагаемых вариантов, должен состоять из 32 проводников  $\phi 0,5 \text{ мм}$ . Сечение одного витка в обмотке  $S = 11,3 \text{ мм}^2$ . Средняя плотность тока в обмотке соленоида при  $I_C = 2750 \text{ А}$  в поле  $5,1 \text{ Т}$   $j_{C \text{ ср}} = 2,43 \times 10^4 \text{ А/см}^2$ , а при  $I_{\text{НОМ}} = 2500 \text{ А}$  в поле  $4,65 \text{ Т}$   $j_{\text{НОМ ср}} = 2,21 \times 10^4 \text{ А/см}^2$ .  $I_C - B$  - характеристика такого кабеля показана на рис. 2.

д). Запасенная энергия соленоида при номинальном токе  $E_{\text{НОМ}} \geq 1 \text{ МДж}$  близка к энергии 5 дипольных магнитов, входящих в суперпериод ускорителя<sup>/1/</sup>.

Таким образом, конструкция и размеры кабеля, а также рабочие и критические его параметры в обмотке подобраны так, чтобы скорость распространения нормальной зоны в соленоиде, по возможности, была близка скорости распространения в дипольном магните "Нуклотрона".

Выбрана простая форма обмотки - цилиндрический соленоид с прямоугольным сечением. Чтобы обеспечить изучение свойств различных видов сверхпроводящих кабелей, обмотка соленоида разделена в аксиальном направлении на 10 секций с промежутками между ними - (см. рис. 1). Такая форма обмотки позволяет легко менять секции местами, заменять или ремонтировать неудачную. Кроме того, уменьшаются механические напряжения сжатия от электродинамических сил, возникающих в обмотке. Наружные размеры должны быть такими, чтобы соленоид мог поместиться в существующем криостате с внутренним диаметром  $800 \text{ мм}$  и высотой  $1770 \text{ мм}$ .

## 2. РАСЧЁТ СОЛЕНОИДА

Сечение обмотки соленоида и обозначения показаны на рис. 1. Соленоид состоит из 10 одинаковых секций. Предполагаем отсутствие ферромагнитных цепей и считаем среду линейной, что позволяет применить принцип суперпозиции.

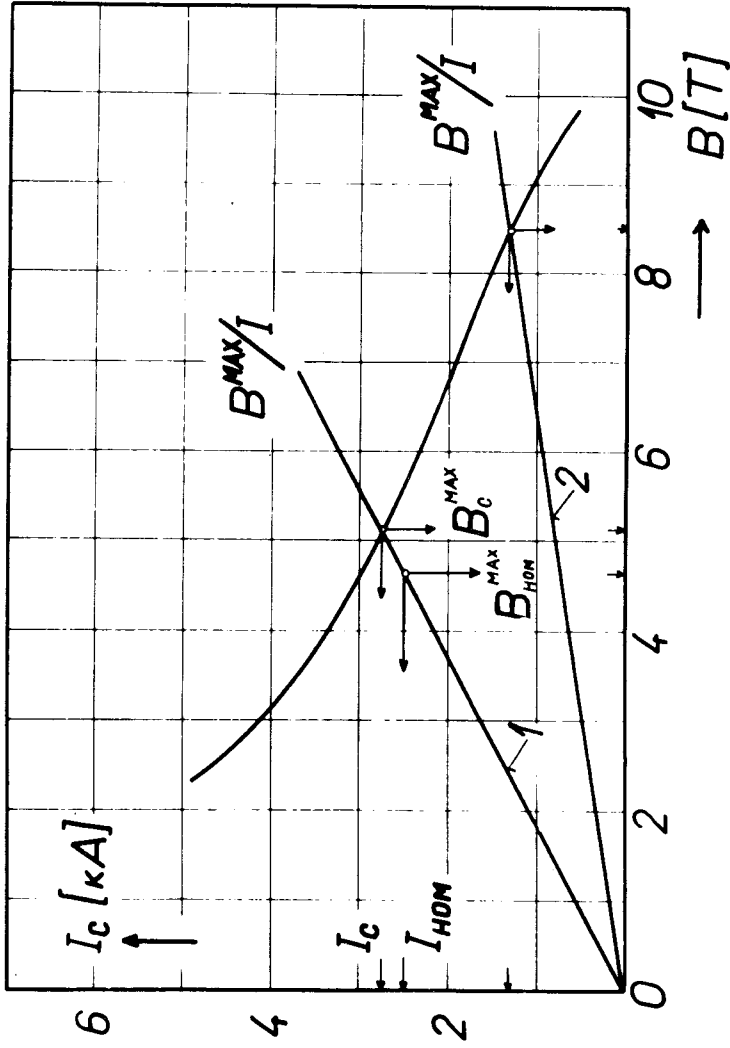


Рис. 2.  $I_c - B$ -характеристика сверхпроводящего кабеля. Характеристики  $V^{\max}/I$  выбранного варианта соленоида (прямая 1) и катушки Брукса (прямая 2).

Целью расчетов является определение оптимальных параметров соленоида при учете заданных требований. Основным при выборе оптимального варианта является определение размеров  $2a_1$ ,  $2b_1$ ,  $2d$  так, чтобы достичь заданную величину запасенной энергии магнитного поля 1,35 МДж при критическом токе соленоида  $I_{cM} = 2750$  А с минимальным объемом обмотки  $V$ .

Критический ток соленоида определяется максимальным значением индукции в обмотке  $V^{\max}$ . Предполагаем, что  $V^{\max}$  находится на внутренней поверхности обмотки (см. /5/). Для расчёта  $V^{\max}$  применен метод, основанный на суммировании вкладов отдельных фиктивных витков, которыми заменяется реальная обмотка соленоида /6/. Величину  $I_{cM}$  находим в точке пересечения постоянной соленоида  $V^{\max}/I$  и  $I_c - B$ -характеристики кабеля -(см. рис. 2).

Расчёт выполнен с помощью специально разработанной программы для ЭВМ. Основной частью программы является итерационный процесс нахождения такой геометрии обмотки, которая позволяет обеспечить заданную  $V^{\max} = 5,1$  Т при  $I_{cM} = 2750$  А с точностью  $\pm \Delta I_{cM} = 15$  А. Итерация необходима потому, что заранее не известен коэффициент  $k_m(a, \beta) = V^{\max}/V_0$ , по которому, исходя из величины поля в центре  $V_0$ , можно найти  $V^{\max}$ .

Расчёт производится следующим образом: заданными входными величинами в программе являются  $V_c^{\max}$ ,  $I_{cM}$ ,  $\Delta I_{cM}$ ,  $S$  и множество значений  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $d$ . Сначала предполагаем, что  $k_m(a, \beta) = 1$ , т.е. что  $V^{\max} = V_0$ . Индексом "n" обозначена "n"-ная из 10 фиктивных катушек, на которые разбит реальный соленоид, чтобы можно было воспользоваться уравнением (см. /7/):

$$V_{0c} = \sum_{n=1}^{10} V_{0cn} = \sum_{n=1}^{10} a_{1j_c} F(a, \beta_n). \quad (1)$$

Для заданных входных величин численным методом (правилом ложного положения) решается уравнение:

$$B_{0c} = \frac{a_1 I_{cm} k_m(a, \beta) \mu_0 10}{S} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \beta_n \ln \frac{a + \sqrt{a^2 + \beta_n^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta_n^2}} \quad (2)$$

Результатом будет нахождение величины  $a$ . Таким образом, геометрия обмотки определена. Для этой геометрии вычислим величины  $V^{\max}/I$  и  $B_0/I$ , из которых определяется реальный коэффициент  $k_m(a, \beta)$ . Вычисляется  $I'_{cm}$ , который сопоставляется с заданной величиной  $I_{cm} = 2750$  А. Так как значение  $k_m(a, \beta) > 1$ , максимальное значение поля  $V^{\max} > V^{\max} = 5,1$  Т и  $I'_{cm} < I_{cm} = 2750$  А. Следующим шагом будет решение уравнения (2) с вычисленным уже значением коэффициента  $k_m(a, \beta)$  и определение новой величины  $a$ . Этот итерационный процесс длится до тех пор, пока не выполнится условие:

$$|I'_{cm} - I_{cm}| \leq \Delta I_{cm} \quad (3)$$

Управляющая величина в итерационном процессе - коэффициент  $k_m(a, \beta)$ . Его невозможно определить аналитически, и потому принят численный метод.

После нахождения варианта, удовлетворяющего условию (3), вычисляется индуктивность  $L$ , запасенная энергия магнитного поля при критическом и номинальном токах и объем обмотки  $V$ .

Весь процесс повторяется для всех величин  $a_1, b_1, d$  из заданного множества. Для наглядности дана принципиальная блок-схема программы (рис. 3).

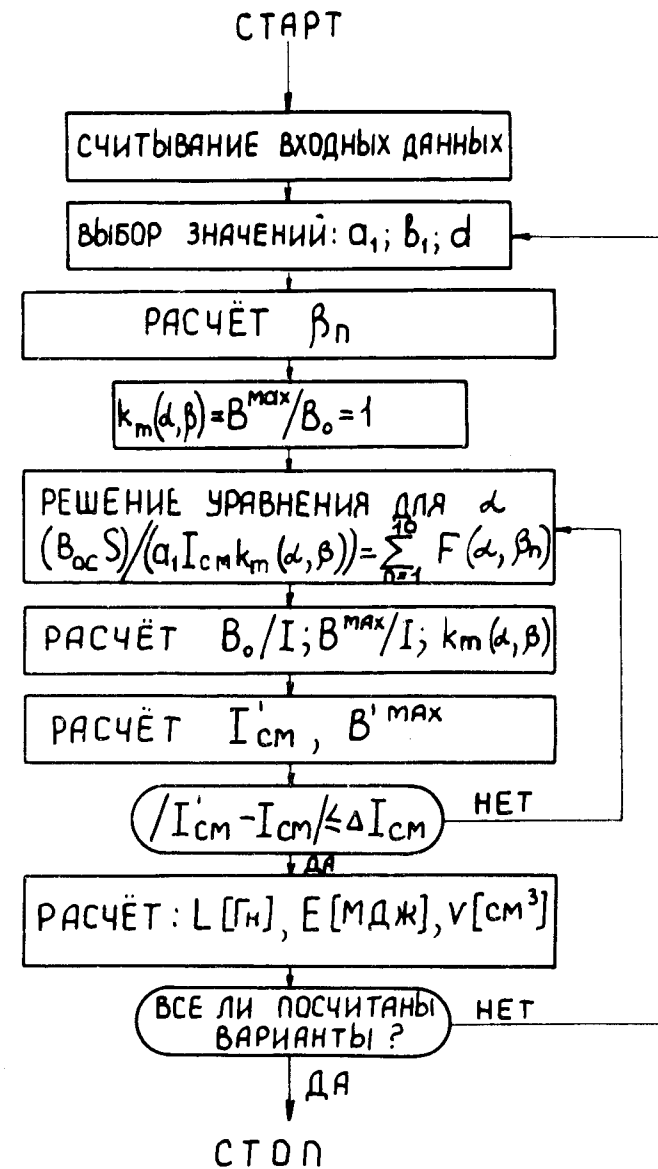


Рис. 3. Блок-схема программы.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Зависимость  $V(2a_1)$  для определенного значения энергии  $E_C$  показана на рис. 4 отдельно для различных значений  $2d$ . Из рисунка видно, что для энергии  $E_C = 1,35$  МДж зависимость  $V(2a_1)$ , начиная с 50 см и выше, меняется незначительно. Это нам позволяет (учитывая внутренний размер криостата  $\phi 80$  см) выбрать  $2a_1 = 50$  см.

Чтобы оценить эффективность использования сверхпроводника, определен для  $2a_1 = 50$  см и  $2d = 0,2,4$  см коэффициент  $E_C/V$  (Дж/см<sup>3</sup>) в зависимости от высоты секций  $2b_1$ . Расчёты показали, что коэффициент  $E_C/V$  повышается с увеличением  $2b_1$ . Это связано с понижением коэффициента  $k_m(\alpha, \beta) = B^{max}/B_0$ , что, в конце концов, приводит к увеличению среднего значения поля в объеме соленоида. Из конструктивных соображений нами выбрано  $2d = 1,6$  см. Расчёты показали, что существует оптимум зависимости  $E_C/V$  от величины  $2d$  при определенном значении  $2a_1$ . Например, при  $2a_1 = 50$  см и  $2b_1 = 4$  см оптимум находится при  $2d \approx 1,6$  см.

Окончательно выбранный вариант соленоида имеет параметры, приведенные в табл. 1.

### 4. СРАВНЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Из множества конструктивно отличных друг от друга сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии нами выбраны для сравнения между собой три типичных конфигурации:

а) Соленоиды (цилиндрические катушки с прямоугольным сечением обмотки).

б) Сферические обмотки (см. /9/, стр. 621, рис. 6.2.26). Предполагаем отсутствие экранирующей обмотки (тонкостенной сферической).

в) Торидальные катушки.

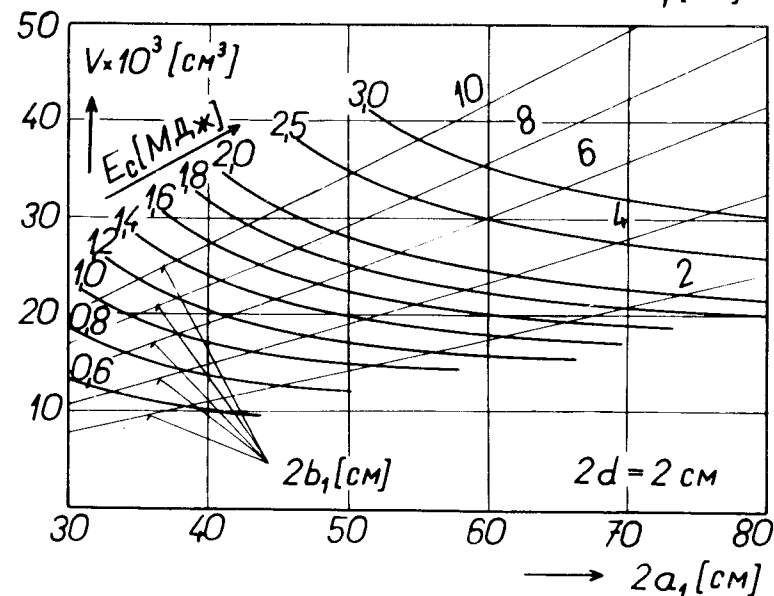
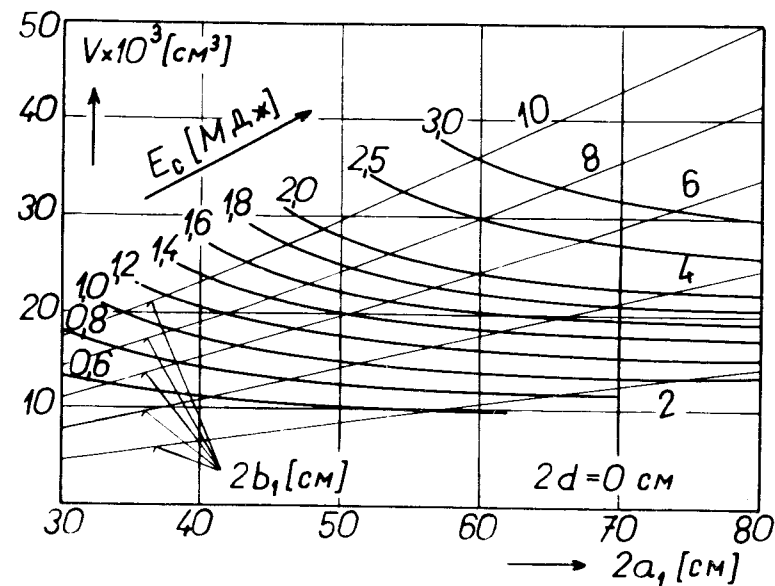


Рис. 4. Зависимость объема обмотки соленоида  $V$  от внутреннего диаметра обмотки  $2a_1$  для запасенной энергии магнитного поля  $E_C$  — с 0,6 до 3 МДж и для величины зазора между катушками  $2d$ : А) 0 см, Б) 2 см.

Таблица I. Параметры выбранного варианта соленоида.

Число секций соленоида			10
Внутренний диаметр обмотки	$2a_1$	см	50,0
Наружный диаметр обмотки	$2a_2$	см	55,34
Высота одной секции	$2b_1$	см	4,4
Промежуток между секциями	$2d$	см	1,6
Полная высота соленоида	$2b$	см	58,4
Объем обмотки соленоида	$V$	см <sup>3</sup>	19416
Длина кабеля	$l$	км	1,72
Число витков соленоида	$N$		927
Индуктивность соленоида	$L$	Гн	0,361
Критический ток соленоида	$I_c$	А	2735
Максимальная индукция в обмотке соленоида при $I_c$	$B_c^{max}$	Т	5,1
Индукция в центре соленоида при $I_c$	$B_{oc}$	Т	4,47
Энергия магнитного поля при $I_c$	$E_c$	МДж	1,35
Номинальный ток соленоида	$I_{ном}$	А	2500
Энергия магнитного поля при $I_{ном}$	$E_{ном}$	МДж	1,12

Сравниваем эти три конфигурации с точки зрения расхода сверхпроводника. Сделанная нами оценка не учитывает стоимости криостатов и возможного ее повышения из-за сложностей, связанных с конструкцией. Во всех трех вариантах предполагаем постоянное значение плотности тока в обмотке.

Для сравнения выбраны следующие исходные параметры: максимальное значение индукции в обмотке  $B_c^{max} = 5,1$  Т при критическом токе сверхпроводящего кабеля  $I_c = 2750$  А, сечение витка обмотки  $S = 0,113$  см<sup>2</sup>, запасенная энергия при  $I_c$   $E_c = 1,35$  МДж.

При определении оптимальной геометрии соленоида (сплошная обмотка без промежутков) исходным является уравнение коэффициента формы (см. /7/):

$$F(\alpha, \beta) = \frac{B_{0c} S}{I_c a_1} = \frac{B_c^{max} S}{k_m(\alpha, \beta) I_c a_1} \quad (4)$$

Так как коэффициент  $k_m(\alpha, \beta) = V^{max}/V_0$  заранее не известен, то неизвестно и значение  $F(\alpha, \beta)$ . Величина  $a_1$  также неизвестна и определяется вместе с высотой обмотки соленоида  $2b$ , в зависимости от требуемой величины запасенной энергии  $E_c$ . Наружный диаметр обмотки определяется значением  $B_c^{max}$ . На рис. 5 приведены зависимости объема и высоты обмотки от  $2a_1$ .

Известно /9-11/, что существует определенная форма обмотки соленоида (катушка Брукса), которая обеспечивает для данного объема обмотки  $V$  максимальную индуктивность. Если плотность тока не лимитируется величиной магнитного поля, то катушка Брукса обеспечивает для заданного  $V$  максимальную запасенную энергию. Для  $V \approx 20000$  см<sup>3</sup> индуктивность  $L = 0,73$  Гн (по сравнению с 0,361 Гн в выбранном нами варианте), но в этом случае  $B_c^{max} = 8,5$  Т при  $I_c = 1310$  А (см. рис. 2), а  $E_c = 0,63$  МДж.

В случае сферической обмотки, в зависимости от заданных требований, задача определения геометрии обмотки решается однозначно.

Для тороидальной катушки радиус тороидального кольца  $R_0$  и внутренний радиус обмотки  $r_1$  определены так, чтобы достичь заданной энергии  $E_c$  с минимальным количеством сверхпроводника. Наружный радиус обмотки  $r_2$  определяется заданными величинами:  $B_c^{max}$ ,  $j_c$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

## 5. ВЫВОДЫ

1. Сформулированы требования к сверхпроводящему соленоиду, предназначенному для изучения свойств кабелей, изоляции и для исследования работы устройств защиты магнитов "Нуклотрона". Особое внимание уделено созданию таких условий распространения нормальной зоны, чтобы скорости распространения в соленоиде и импульсных магнитах были близки между собой.



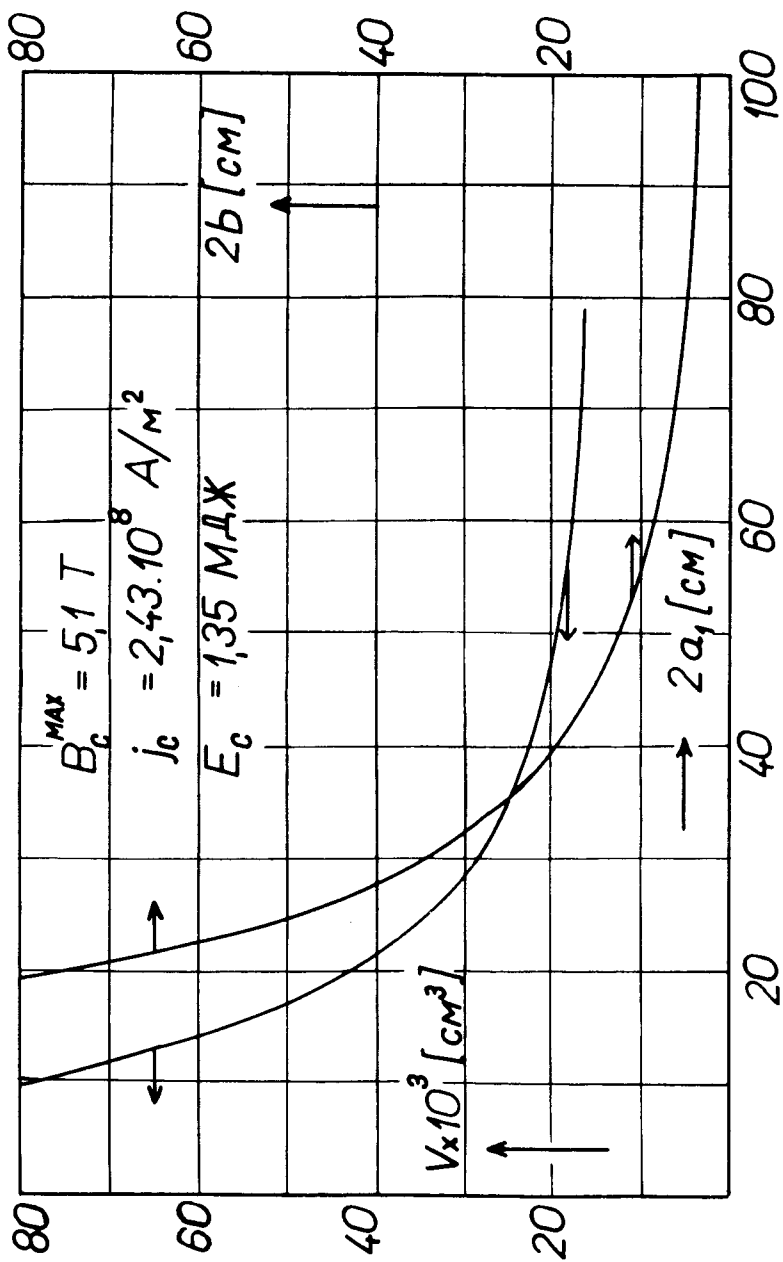


Рис.5. Зависимость объема  $V$  и высоты обмотки  $2a_1$  в зависимости от внутреннего диаметра обмотки  $2a_1$  для цилиндрического соленоида.

Таблица 2. Сравнение сверхпроводящих индуктивных накопителей энергии (максимальное поле в обмотке  $B_c^{max} = 5,1 \text{ T}$  при критическом токе  $I_c = 2750 \text{ A}$ , запасенная энергия  $E_c = 1,35 \text{ МДж}$ .)

Тип сверхпроводящего индуктивного накопителя	Объем обмотки $V [cm^3]$	Эффективность использования сверхпроводника $E_c/V [Дж/cm^3]$	Геометрия обмотки $[cm]$
Катушка Брукса	40800	33,1	$a_1 = 16,3$ $a_2 = 32,6$ $b = 8,15$
Сферическая обмотка	24500	55,1	$a_1 = 26,6$ $a_2 = 29,2$
Тороидальная обмотка	35000	38,6	$R_0 = 46$ $r_1 = 23$ $r_2 = 23,8$
Оптимальный соленоид <sup>*</sup>	16000	84,4	$a_1 = 50$ $a_2 = 53$ $b = 17,5$
Выбранный вариант соленоида	19500	69,5	см.табл. I

\* Оптимальный для данных требований (см.Введение).

2. Составлена программа на ЭВМ для расчета размеров обмотки, учитывающая конструктивные особенности соленоида и обеспечивающая минимальный в данных условиях расход сверхпроводника.

3. Найдены размеры соленоида на запасенную энергию 1,12 МДж.

4. Проведено сравнение эффективности использования сверхпроводника в соленоиде, катушке Брукса, сферической и тороидальной обмотках на одинаковую запасенную энергию (~ 1 МДж). Расчетом показано, что минимальный расход сверхпроводника получается при использовании соленоида.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.П.Алексеев, А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих и др. ОИЯИ, 9-7148, Дубна, 1973.
2. Е.А.Галстьян, Л.И.Гребень. Труды Радиотехнического Института АН СССР, №15. "Применение сверхпроводимости в ускорительной технике". 118, Москва, 1973.
3. В.П.Алексеев, А.А.Васильев, и др. Труды Радиотехнического Института АН СССР, №15, 91, Москва, 1973.
4. F.Kircher. KEK Lecture Note, KEK-75-14, Dec. 1975. Nat. Lab. for High Energy Physics, ОНО-MAGNI, TSUKUBA-GUN, IBARAKI, Japan.
5. P.L.Walstrom, M.S.Lubell. Journ. Appl. Physics, vol.44, No.9, 4195, 1973.
6. L.Cesnak, D.Kabat. Elektrotechnicky obzor, Sv.59, cis. 7,338, 1970.
7. Д.Монтгомери. "Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов", пер. с англ., "Мир", Москва, 1971, стр. 158.
8. П.Л.Калантаров, Л.А.Цейтлин. "Расчёт индуктивности", "Энергия", Ленинград, 1970, стр. 229.
9. Г.Брехна. "Сверхпроводящие магнитные системы", пер. с англ., "Мир", Москва, 1976, стр. 621.
10. S.L.Wipf. Supraleitende Energiespeicher, Bericht Max-Planck-Inst. für Plasmaphysik, Garching bei München, IPP2/211, Febr., 1973.
11. H.Brechna, F.Arendt, W.Heinz. Proc. 4th Int. Conf. Magnet Technology, Brookhaven, 29, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 августа 1976 года.