

СЗУЧ. 1д

5/2-70

Б-733

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 5211



В.А. Богач, Е.В. Гераскин, В.Г. Гребинник,  
В.А. Жуков, Л.З. Камский, В.Ф. Кечкин,  
Н.А. Полковникова, Г.И. Селиванов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

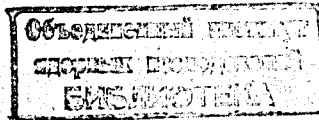
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ  
ДЛЯ 40-САНТИМЕТРОВОГО СОЛЕНОИДА  
ЖИДКОВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ

1970

13 - 5211

В.А. Богач, Е.В. Гераскин, В.Г. Гребинник,  
В.А. Жуков, Л.З. Камский, В.Ф. Кечкин,  
Н.А. Полковникова, Г.И. Селиванов

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ КАБЕЛИ  
ДЛЯ 40-САНТИМЕТРОВОГО СОЛЕНОИДА  
ЖИДКОВОДОРОДНОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ



Для обеспечения стабильной работы крупных сверхпроводящих соленоидов при максимально возможных средних плотностях тока в их обмотках используются комбинированные проводники<sup>/1,2/</sup>, состоящие из сверхпроводящего материала и находящегося с ним в тесном электрическом и тепловом контакте нормального металла с малым удельным электрическим сопротивлением при гелиевых температурах. Степень стабилизации такого проводника определяется параметром  $\alpha$ , введенным Стекли<sup>/2/</sup>:

$$\alpha = \frac{I_c^2 R}{h A (T_{ch} - T_b)} \quad (1)$$

где:  $I_c$  — критический ток сверхпроводника в данном магнитном поле;

$T_{ch}$  — критическая температура при нулевом токе в данном магнитном поле;

$T$  — температура гелиевой ванны;

$R$  — сопротивление на единицу длины проводника;

$A$  — площадь, приходящаяся на единицу длины проводника;

$h$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности к жидкому гелию.

Условие  $\alpha < 1$  характеризует стабильное сверхпроводящее состояние комбинированного проводника при транспортном токе, равном критическому. Если  $\alpha > 1$ , то проводник является частично стабилизированным. В этом случае стабильное сверхпроводящее состояние возможно лишь при токах, меньших, чем  $I_c$ :

$$I_r = \frac{I_c}{\sqrt{a}} \quad (2)$$

Важнейшими характеристиками комбинированных проводников являются критический ток  $I_c$ , ток перехода в состояние нормальной проводимости  $I_t$ , ток восстановления сверхпроводимости  $I_r$  и минимальный ток распространения нормальной фазы  $I_p$ .

Величина тока  $I_t$  определяется переходом от пузырькового кипения к пленочному. Этот переход происходит при незначительном росте температуры проводника ( $\approx 0,5 + 1^\circ \text{K}$ ) и максимальном удельном тепловом потоке  $g_n$ , достигающем для пузырькового кипения в случае открытой поверхности  $0,8 \text{ вт/см}^{2/3,4/}$ . Ток восстановления  $I_r$  соответствует переходу от пленочного кипения к пузырьковому, который имеет место при более низком значении удельного теплового потока, например,  $g_r \approx 0,15 \text{ вт/см}^{2/3/}$  и зависит от критической температуры сверхпроводника. С точки зрения достижения максимально возможных плотностей тока в частично стабилизированных сверхпроводниках важно знать ток  $I_p$ , ниже которого не происходит распространения случайно возникшей из-за тепловых флуктуаций нормальной фазы вдоль проводника. Выражение для  $I_p$  имеет вид<sup>/5/</sup>:

$$I_p = I_c \left( \sqrt{\frac{1}{4a^2} + \frac{2}{a}} - \frac{1}{2} a \right), \quad (3)$$

где  $a$  — параметр Стекли. Величина удельного потока  $q_e$ , соответствующего  $I_p$ , оценивалась в работе<sup>/3/</sup>. Оценки показали, что типичные значения  $q_e$  для различных катушек находятся в пределах  $0,29+0,48 \text{ вт/см}^2$ .

Существует ряд методов измерения перечисленных выше токов и соответствующих им удельных тепловых потоков.

Ток  $I_p$  определяется по началу распространения вдоль проводника нормальной зоны, искусственно созданной с помощью магнитных<sup>/6/</sup> или тепловых<sup>/7/</sup> импульсов. Эта зона может быть также создана путем замены на отдельном участке комбинированного проводника сверхпроводящих жил

обычным металлом<sup>/8/</sup>. Распространение нормальной зоны по всему проводнику в этом случае происходит при токе  $I_t$ .

Значение тока  $I_t$  и соответствующего ему теплового потока  $q$ , определяют, понижая ток в комбинированном проводнике, предварительно выведенном из сверхпроводящего состояния.

Настоящая работа была предпринята с целью создания и испытания 4-х типов сверхпроводящих кабелей для 40-сантиметрового соленоида действующей жидководородной пузырьковой камеры<sup>/9/</sup>.

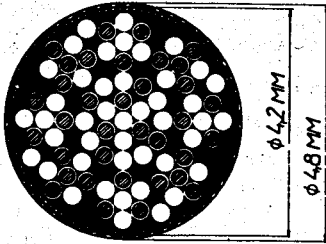
### Конструктивное исполнение кабелей

Конструкции кабелей показаны на рис. 1. Токоведущая часть всех кабелей выполнена методом правильной скрутки стренг, состоящих из сверхпроводящих и медных проволок. Кабели №1 и №2 имеют центральную 19 проволочную стренгу, вокруг которой уложено в процессе скрутки восемь семипроволочных стренг. Кабели №3 и №4 состоят из 7 стренг, содержащих по 7 проволок каждая. С целью повышения устойчивости конструкции промежутки (через один) между стренгами во внешнем повороте заполнены медной проволокой. Скрученные между собой стренги заключены в оплетку из медной проволоки, которая предотвращает возможное их расплетение и улучшает стабилизацию.

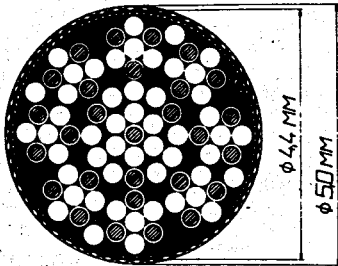
В процессе отработки технологии изготовления кабелей большое внимание уделялось выбору шагов скрутки, от которых зависит гибкость жилы, экономичный расход сверхпроводящих материалов и технологичность процесса производства на последующих стадиях изготовления кабелей.

Индирирование кабелей производилось на специальной установке горячего покрытия после тщательной предварительной подготовки поверхности проволок (обезжиривание органическими растворителем, травление в смеси бихромата аммония и серной кислоты с последующей промывкой и сушкой). Исследование ряда флюсов показало, что наилучшие результаты достигались при применении флюса на основе солянокислого гидразина.

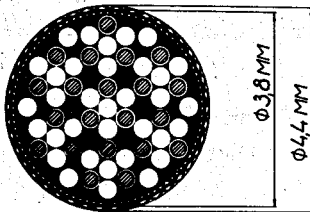
В качестве сверхпроводящего материала использована проволока из сплавов 65-БТ (кабель №1) и Nb+50% Zr (кабели №2, 3, 4). Критические характеристики коротких образцов этих материалов были измерены перед



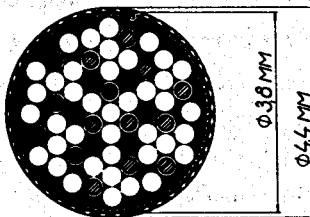
Кабель №1. 35 сверхпроводящих жил из сплава  $65\text{Bi} + 44$  медных жилы.  $I_c = 1000$  а в поле  $65$  кэс.



Кабель №2. 28 сверхпроводящих жил из сплава  $\text{Nb} + 50\% \text{Zr} + 51$  медная жила.  $I_c = 1000$  а в поле  $60$  кэс.



Кабель №3. 21 сверхпроводящая жила из сплава  $\text{Nb} + 50\% \text{Zr} + 34$  медных жилы.  $I_c = 1000$  а в поле  $50$  кэс.



Кабель №4. 15 сверхпроводящих жил из сплава  $\text{Nb} + 50\% \text{Zr} + 40$  медных жилы.  $I_c = 1000$  а в поле  $45$  кэс.

- - сверхпроводник;
- - медь;
- - индл.

- — — — — медная оплетка+индл.
- — — — — оплетка из лавсана

Рис 1 Сверхпроводящие кабели, предназначенные для соленоида жидководородной пузырьковой камеры.

комплектацией кабелей сверхпроводящими проволоками, число которых в каждом типе кабеля затем выбиралось с учётом распределения магнитного поля по сечению обмотки<sup>/10/</sup>. На рис. 2 и 3 показаны области разброса критических характеристик сверхпроводников, использованных в кабелях №1 и №4.

Стабилизирующим материалом служит бескислородная медь марки МБ сорт А (99,7%), подвергнутая специальной обработке для обеспечения высоких электрических и механических характеристик. При этом отношение удельных сопротивлений, измеренных при комнатной и гелиевой температурах и нулевом значении магнитного поля, составляет  $\approx 100$ . Зависимость удельного сопротивления стабилизирующего материала от величины поперечного магнитного поля представлена на рис. 4. Эта зависимость была найдена из вольт-амперных характеристик образцов кабелей.

Изоляция кабелей представляет собой сетчатую оплетку из лавсановой тесьмы. Плотность оплетки составляет 30%, а толщина по радиусу — 0,4 мм. Предел прочности изоляции на сжатие, определяемый по появлению электрического контакта между соседними проводниками, составил при 300°K  $\approx 100$  тонн на метр длины кабеля. В 40-сантиметровом сверхпроводящем соленоиде сила притяжения между двумя катушками составляет  $\approx 600$  тонн<sup>/11/</sup>, что соответствует средней нагрузке на кабель  $\approx 6,5$  тонн/метр.

#### Измерения характеристик образцов кабелей

Измерения токовых характеристик стабилизированных кабелей проводились в поперечном магнитном поле сверхпроводящего соленоида, создающего максимальное поле 50 кгс в рабочем объеме диаметром 22 мм<sup>/11/</sup>. При использовании концентраторов из стали армко, имеющих зазор между полюсами 5 мм, величина магнитного поля достигала 65 кгс. Исследовались как короткие образцы кабеля, устанавливаемые между полюсами концентраторов (рис. 5а), так и навитые на текстолитовый каркас диаметром 9 мм небольшие однослойные катушки (рис. 5б), помещаемые непосредственно в рабочий объем соленоида.

Неоднородность магнитного поля в области расположения катушек составляла 2%. На небольшой длине ( $\approx 15$  мм) каждого образца в области

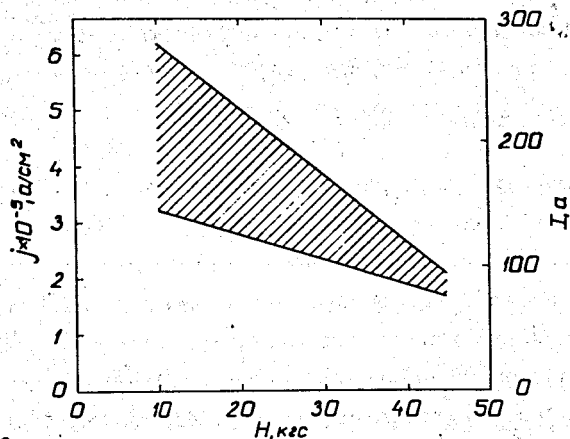


Рис 2 Область критических характеристик коротких образцов проволок из сплава Nb+50%Zr, использованных в кабеле №4.

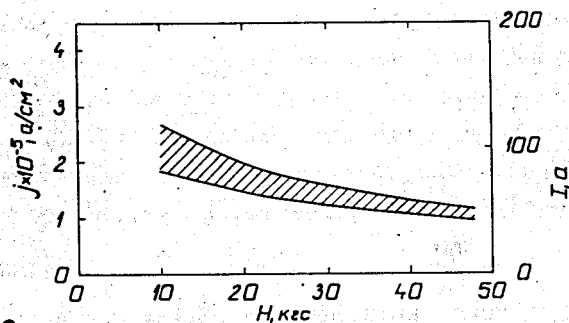


Рис 3 Область критических характеристик коротких образцов проволок из сплава 65Bi, использованных в кабеле №1.

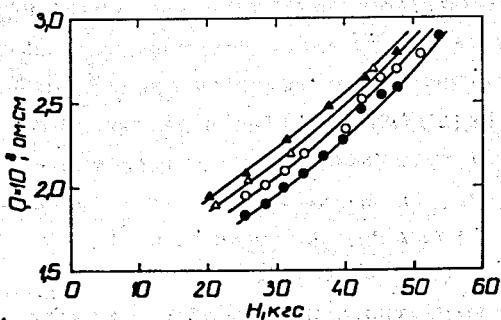


Рис 4 Зависимость удельного сопротивления стабилизирующего материала сверхпроводящих кабелей от напряженности магнитного поля при гелиевой температуре. Кабели: о - №1, ● - №2; △ - №3; ▲ - №4



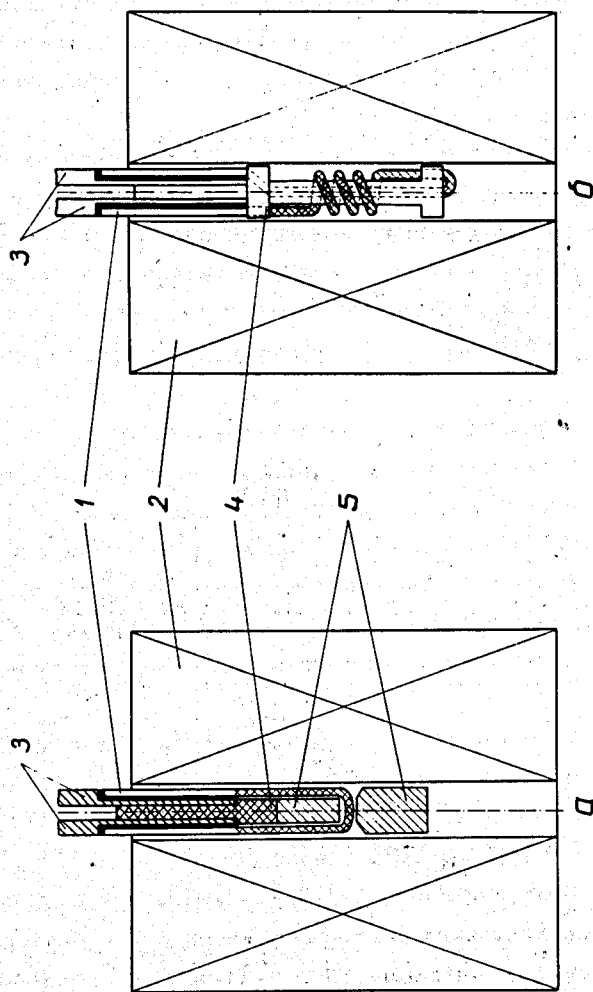


Рис. 5 Схемы испытанной образцов кабеля:  
 а-короткий образец в зораре ферромагнитного сердечника; б-однослойная катушка.  
 1.Сверхпроводящий кабель. 2.Соленоид.  
 3.Токопроводы. 4.Изолятор из текстолита. 5. Ферромагнитный сердечник.

максимального поля устанавливался нагреватель. Ряд потенциальных выводов позволял контролировать напряжение на различных участках образца. Ток и напряжение образца регистрировались 2-координатным самопишущим потенциометром типа ПДС-021.

Ввод тока в образец осуществлялся через охлаждаемые потоком испарившегося гелия медные ленточные токовводы сечением 60 мм<sup>2</sup> каждый, что позволяло пропускать ток до 3000 а. Верхние участки токовводов дополнительно охлаждались жидким азотом. Источником тока служил мотор-генератор АНДМ-1500, обеспечивающий в форсированном режиме ток до 3000 а. Питание нагревателя осуществлялось от импульсного источника, создающего тепловые импульсы мощностью до 1 вт.

Вольт-амперные характеристики для одного из исследуемых типов кабеля представлены на рис. 6. Напряжение на коротком образце кабеля, помещенного в зазоре концентратора, появляется при токе  $I_c$  и плавно увеличивается до тока  $I_t$ , определяемого переходом от пузырькового кипения к пленочному. При уменьшении тока и снижении температуры образца ниже  $T_{ch}$  происходит восстановление сверхпроводимости при токе  $I_p$ .

На этом же рисунке приводятся вольт-амперные характеристики для однослойной катушки, отдельный участок которой подогревается тепловым импульсом. На рис. 6б представлена зависимость напряжения от тока для подогреваемого участка, а на рис. 6в - для всей катушки. Из рис. 6в видно, что при токе 740 ампер нормальная зона распространяется по всей катушке и не исчезает, когда тепловые импульсы от нагревателя прекращаются. Этот ток определялся как минимальный ток распространения нормальной зоны  $I_p$ .

Зависимость основных токов  $I_t$ ,  $I_c$ ,  $I_t$  и  $I_p$  от напряженности магнитного поля показана на рис. 7. Средняя плотность критического тока сверхпроводящего материала кабелей составляет в магнитном поле напряженностью 50 кгс  $\approx 1 \cdot 10^5$  а/см<sup>2</sup>, в поле 30 кгс -  $1,3 \cdot 10^5$  а/см<sup>2</sup> для кабеля №1 и  $\approx 1,8 \cdot 10^5$  а/см<sup>2</sup> для кабелей №2, 3, 4. Следует отметить, что измеренное значение критического тока  $I_c$  для кабелей оказалось ниже суммарной величины критического тока отдельных сверхпроводящих проволок приблизительно на 20 - 30%.

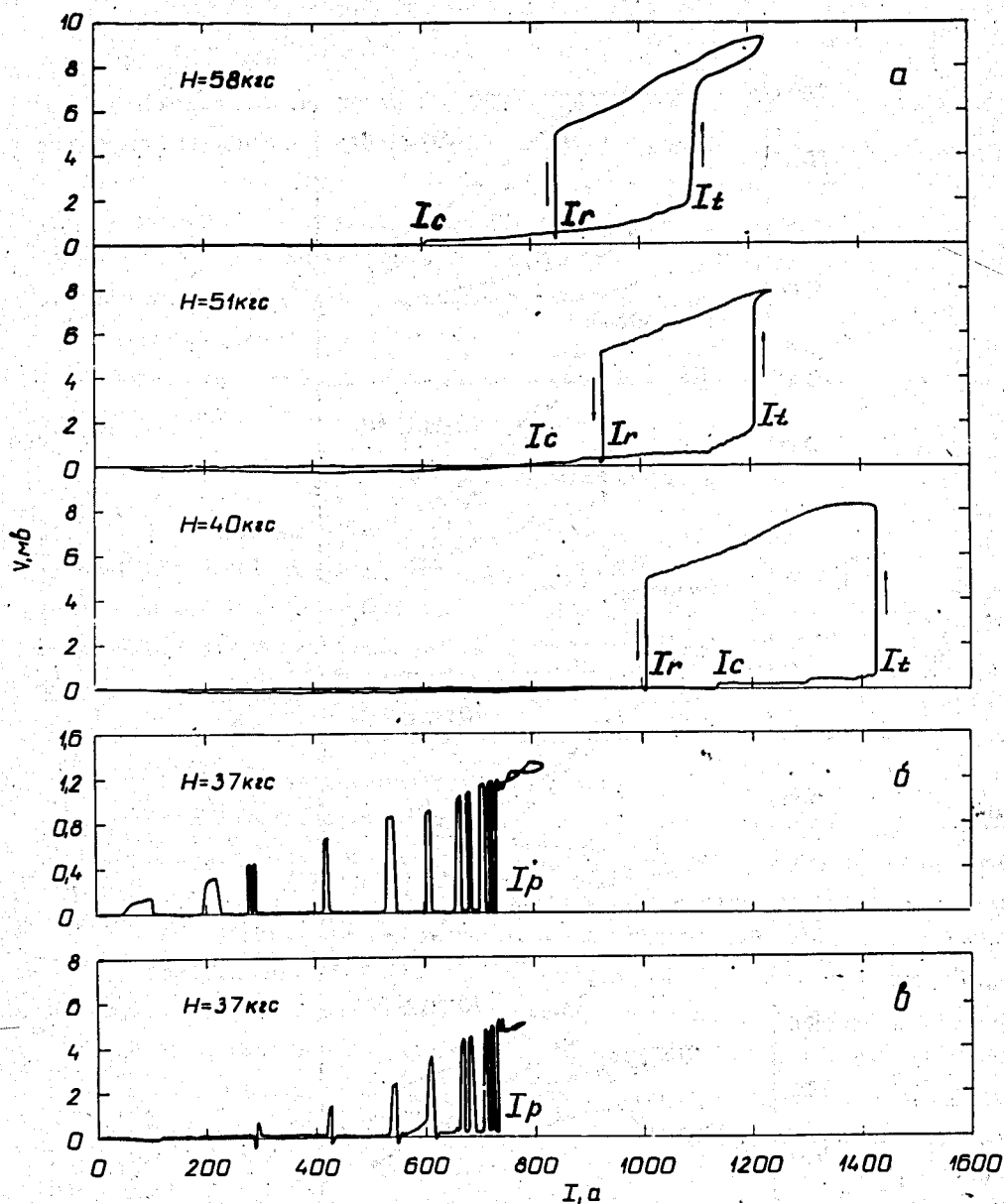


Рис 6 Типичные вольт-амперные характеристики кабеля №3: а-для короткого образца кабеля без импульсного подогрева; б-для короткого участка однослойной катушки, подогреваемого тепловым импульсом; в-для всей катушки, отдельный участок которой подогревается тепловым импульсом.

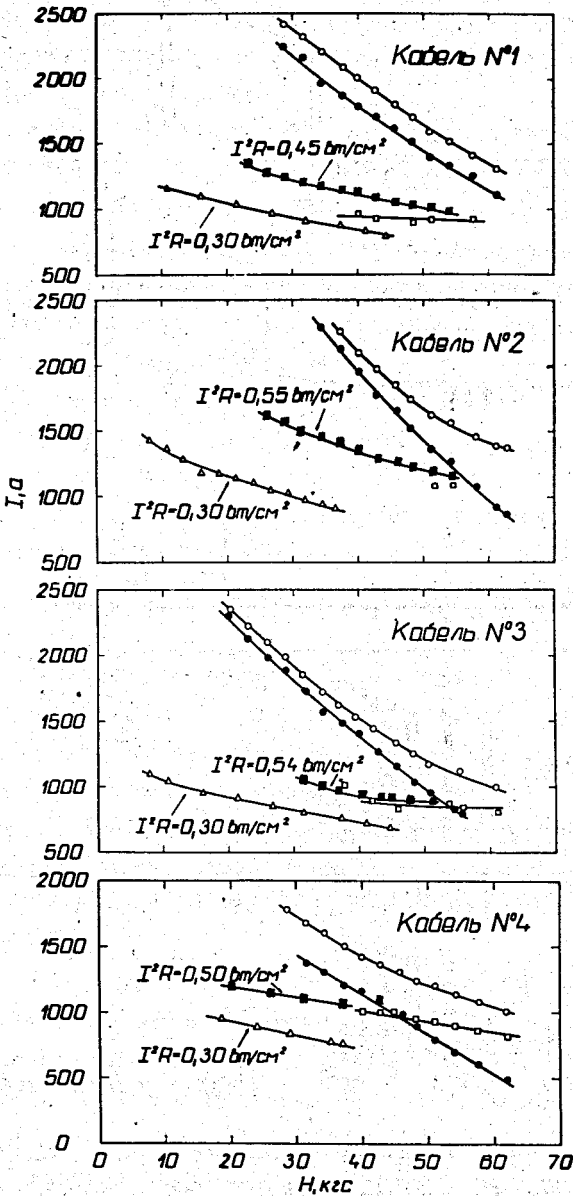


Рис. 7 Зависимость основных токов сверхпроводящих кабелей от напряженности магнитного поля  
 ○ — ток перехода,  $I_t$ ; ● — критический ток,  $I_c$ ;  
 ■, □ — ток восстановления сверхпроводимости,  $I_r$ ; △ — ток распространения,  $I_p$ .

Токи восстановления сверхпроводимости  $I_r$  были определены для коротких образцов кабеля как с импульсными нагревателями ( $I^2 R \approx 0,5$ ), так и без них. Из рис. 7 видно, что значения токов восстановления, полученные этими методами, в пределах точности измерений совпадают. Минимальный ток распространения нормальной зоны  $I_p$  оказался равным приблизительно 750 ампер для всех кабелей в магнитном поле 40 кгс. При этом действительная величина удельного теплового потока с поверхности кабеля, полученная с использованием данных по нормальному сопротивлению стабилизирующего материала, составила  $0,30$  вт/см<sup>2</sup>.

#### Основные выводы и результаты

Разработаны и изготовлены сверхпроводящие кабели 4-х типов на токи 1000 ампер для магнитных полей 65, 60, 50 и 45 кгс.

Проведено измерение коротких образцов этих кабелей. При этом максимальный удельный тепловой поток  $q_n$  для пузырькового кипения был найден равным  $0,8 \pm 0,9$  вт/см<sup>2</sup>, а минимальный поток  $q_l$  для пленочного кипения, соответствующий восстановлению сверхпроводимости -  $0,4 \pm 0,6$  вт/см<sup>2</sup>. Эти значения согласуются с данными, приведенными в работах<sup>3,4/</sup>

Токи восстановления для всех типов кабелей, найденные из вольт-амперных характеристик для коротких образцов, полученных с нагревателем и без него, согласуются со значениями токов, вычисленными по формуле (2) с использованием действительной величины для удельного потока.

Токи распространения для однослойных катушек, измеренные методом импульсного нагрева, меньше величин, полученных из формулы (3), и в пределах точности измерений близки к значениям токов восстановления, определяемым формулой (2). Указанные расхождения, по-видимому, объясняются сравнительно малой длиной ( $\approx 10$  см) измеряемого участка кабеля.

Полученные результаты позволяют надеяться, что данные кабели смогут обеспечить расчётные характеристики соленоида жидководородной пузырьковой камеры.

В заключение авторы выражают благодарность группе Н.И. Баландикова за бесперебойное снабжение жидким гелием, а также Ю.А. Кузнецову и А.П. Манычу за помощь при проведении измерений.

## Литература

1. C. Laverich. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 9, 558 (1964).
2. Steekly Z.I.I., Zar I.L., *Trans. IEEE, NS-12*, 367 (1965).
3. Maddock B.I. et al. *Cryogenics*, August (1969).
4. Wilson M.N. *Proc. II Intern. Conf. on Magnet Technology*, 482 Oxford, 1967.
5. Кейлин В.Е. и др. Сб. "Les champs magnetiques intenses", Paris, 231 (1967).
6. Donadien L., Roubean P. Там же, стр. 303.
7. Cummings R.D. and Smith I.L. *Liquid Helium Technology*, p. 85, Pergamon, Oxford, 1966.
8. Purcell I.R. and Brooks I.M. *J. Appl. Phys.*, 38, 3109 (1967).
9. Багдасаров С.К. и др. Материалы рабочего совещания по технике пузырьковых камер. Сообщение ОИЯИ 13-4466, 138 (1969).
10. Ткачёв Л.Г. Там же стр. 150.
11. Гераскин Е.В. и др. Там же стр. 142.

Рукопись поступила в издательский отдел

30 июня 1970 года.