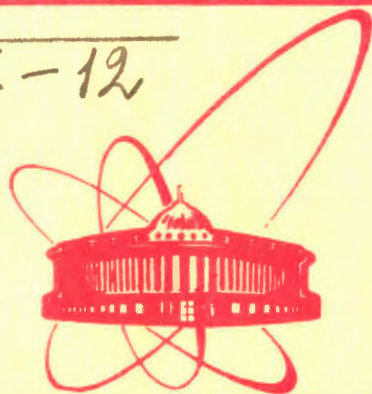


К-12



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

2445/2-81

18/5-81

8-81-122

Д.Кабат, В.Г.Луппов, Ю.А.Шишов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ  
В КОМПОЗИТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА  
ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
В АДИАБАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Направлено на 7 Международную конференцию  
по магнитной технологии /ФРГ, 1981/

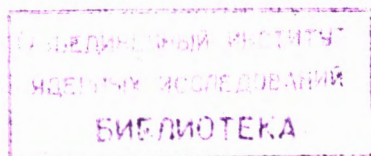
1981

При создании сверхпроводящих магнитов /СМ/ постоянного тока обычно не учитывают влияния энергетических потерь в сверхпроводнике на поведение обмотки в период эвакуации энергии. Однако, как показывает эксперимент, криостатически нестабилизированные обмотки с высокой средней плотностью тока в процессе эвакуации могут переходить в нормальное состояние<sup>/1/</sup>. Это происходит под воздействием нагрева, вызываемого выделяющимися при падении магнитного поля энергетическими потерями. Причем по мере стремления к высоким средним плотностям тока в обмотках СМ условия их охлаждения приближаются к адиабатическим. В ряде случаев скорость распространения нормальной зоны в обмотке под влиянием потерь намного превышает скорость распространения за счет тепловой диффузии<sup>/2/</sup>. В результате быстрого роста омического сопротивления СМ с одной стороны, падает эффективность эвакуации энергии, но, с другой, уменьшается опасность локального перегрева проводника. Таким образом, изучение энергетических потерь в сверхпроводниках, находящихся в подобных условиях, может помочь разобраться в происходящих в обмотках СМ переходных процессах. По-видимому, можно влиять на эти процессы выбором проводника и конструкции обмотки. Отсутствие в литературе данных о потерях в адиабатических условиях привело нас к необходимости исследовать этот вопрос. В настоящей работе сделан первый шаг в изучении потерь в проводниках, находящихся в адиабатических условиях, которые используются в СМ постоянного тока. Измерены потери в многожильных проводах диаметром 0,7-1,5 мм под влиянием поперечного магнитного поля, которое падает от некоторой максимальной величины до нуля по экспоненциальному закону.

#### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ

Для измерения потерь в адиабатических условиях разработана методика, основанная на измерении максимальной температуры образца при воздействии импульса магнитного поля. Необходимое для нагрева до этой температуры количество энергии определялось путем калибровки с помощью импульсного нагревателя.

Образец сверхпроводника, имеющий форму цилиндрической спирали, помещен в камеру, которая с целью создания адиабатических условий отвакуумирована. Степень адиабатичности определялась



по временному падению температуры образца. За время от начала процесса до момента достижения максимальной температуры теплопровод составлял не более 1% от выделившейся энергии.

Импульсы магнитного поля с экспоненциальным характером его падения /имитирующим условия, в которых находится обмотка в процессе эвакуации энергии из СМ/ создавались путем переключения СМ с источника тока на омические сопротивления разной величины. Внешнее магнитное поле направлено параллельно оси спирали образца.

Потери, возникающие в образце при изменении поля от начальной величины  $V_M$  до нуля, нагревают его до некоторой максимальной температуры  $T_{max}$ , которая фиксировалась. На наружную поверхность образца соосно намотан нагреватель, а к внутренней поверхности приклеен в качестве датчика температуры резистор фирмы Аллен Бредли (1/8 Вт, 1000 Ом при 4,2 К, измерительный ток 10 мкА). С помощью серии разрядов известного количества энергии на эту нагревательную обмотку для каждого образца построена калибровочная кривая  $T_{max}$  как функция энергии/. По этой кривой определялась энергия, соответствующая количеству тепла, необходимого для нагрева от 4,2 К до данной максимальной температуры при выделении потерь.

Охлаждение образца до исходной температуры 4,2 К осуществлялось остаточным газообразным гелием, которым манипулировали с помощью угольного абсорбента с нагревателем.

Точность измерений, по нашим оценкам, не хуже 5%.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Измерены образцы композитных сверхпроводников с жилами из сплава  $Nb-50^{1/3}/Nb-50$  вес.%  $Ti$  / в медной матрице. Все сверхпроводники содержат 61 жилу с шагом твиста 25 мм. Коэффициент заполнения композита  $\lambda \approx 0,5$ . Характеристики исследованных образцов приведены в таблице:

| Образец № | Диаметр /мм/ | Козфф. заполн. | Диаметр жил /мкм/ | Крит. темпер. /К/ |
|-----------|--------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 1         | 0,7          | 0,50           | 65                | 9,6               |
| 2         | 1,2          | 0,49           | 110               | 9,4               |
| 3         | 1,5          | 0,47           | 140               | 9,4               |

Измерена теплоемкость образцов. Например, для образца №3  $\phi 1,5$  мм температурную зависимость теплоемкости в нулевом магнитном поле можно описать следующими выражениями в зависимости от температурного диапазона:

$$\left. \begin{aligned} 4,2 \text{ К} \leq T \leq 9,0 \text{ К} & \quad C(T) = 0,0045 T^3 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]} \\ 9,0 < T < 9,4 \text{ К} & \quad C(T) = -2,075 T + 21,955 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]} \\ 9,4 \leq T < 20,0 \text{ К} & \quad C(T) = 0,04 T + 0,0025 T^3 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]} \end{aligned} \right\} /1/$$

Удельный вес данного образца  $\gamma = 6,8 \text{ г/см}^3$ . Зависимость теплоемкости от индукции магнитного поля, на основе измерений, приведенных в работе<sup>4/</sup>, аппроксимировалась выражением:

$$C(T, B) = C(T) \cdot (1 + 0,05 B) \quad /2/$$

Для каждого образца измерена также критическая температура, которая определена как температура, соответствующая значению  $R/R_n = 0,5$ .

Кроме того, измерена зависимость критической плотности тока от индукции магнитного поля при 4,2 К. Зависимость критической плотности тока от температуры определялась по формуле, предложенной в работе<sup>5/</sup>:

$$J_c(B, T) = J_c(B) \cdot \left(1 - \frac{T - T_b}{T_c - T_b} \cdot \frac{B_{c2}}{B_{c2} - B}\right), \quad /3/$$

где  $J_c(B)$  - критическая плотность тока при  $T = 4,2 \text{ К}$ ;  $T_c$  - критическая температура при  $B = 0$ ;  $T_b$  - температура ванны /4,2 К/;  $T$  - температура образца;  $B_{c2}$  - верхнее критическое магнитное поле.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерены энергетические потери при экспоненциальном характере падения поперечного магнитного поля от максимальной величины поля  $V_M$  до нуля с временной постоянной  $\tau$ . Исследовались зависимости потерь как от  $V_M$  /амплитуды/, так и от начальной скорости его падения  $V_M/\tau$ .  $V_M$  менялась от  $\sim 0,5$  до 5 Т,  $V_M$  - от  $\sim 0,5$  до 5 Т /л.

В качестве примера на рис.1 приведена зависимость потерь  $W$  на единицу объема всего композитного сверхпроводника диаметром 1,2 мм от  $V_M/\tau$  при постоянных значениях его амплитуды. Насыщение зависимости потерь от величины  $V_M/\tau$  обусловлено достижением критической скорости изменения магнитного поля<sup>5/</sup>, которая, по нашим оценкам, составляет  $\sim 1 \text{ Т/с}$ . На рис.2 пока-

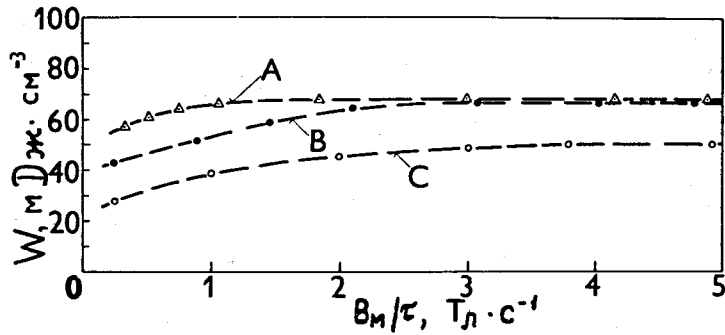


Рис.1. Потери на единицу объема композитного сверхпроводника  $W$  [МДж/см<sup>3</sup>] диаметром 1,2 мм в адиабатических условиях в зависимости от начальной скорости падения магнитного поля  $V_M/\tau$  [Тл/с]. Параметром является амплитуда поля: А -  $V_M = 3$  Тл, В -  $V_M = 1$  Тл, С -  $V_M = 0,5$  Тл.

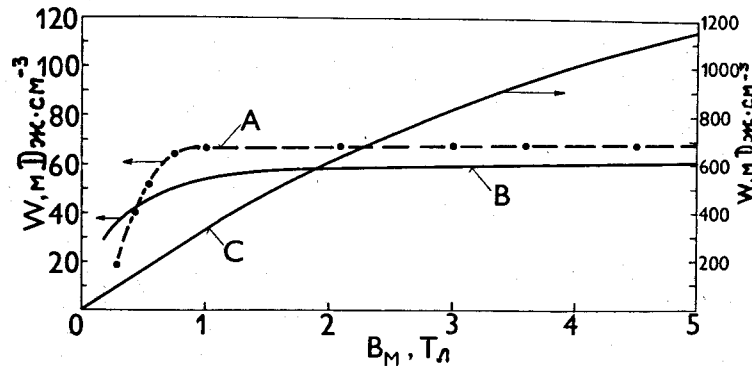


Рис.2. Потери на единицу объема композитного сверхпроводника  $W$  [МДж/см<sup>3</sup>] диаметром 1,2 мм в зависимости от амплитуды магнитного поля  $V_M$  [Тл] при постоянной величине  $V_M/\tau = 3$  Т/с; штрихованная кривая - эксперимент в адиабатических условиях; кривая В - расчет в адиабатических условиях; сплошная кривая С - расчет в изотермических условиях.

зана зависимость  $W(V_M)$  при постоянном значении  $V_M/\tau$ . На рис.3 приведена величина удельных потерь образцов диаметром 0,7; 1,2 и 1,5 мм /см. табл./ для одинаковых значений  $V_M = 5$  Т,  $V_M/\tau = 3$  Т/с.

Характер зависимостей  $W(V_M/\tau)$  /при  $V_M = \text{const.}$ / и  $W(V_M)$  /при  $V_M/\tau = \text{const.}$ / для образцов диаметром 0,7 и 1,5 мм анало-

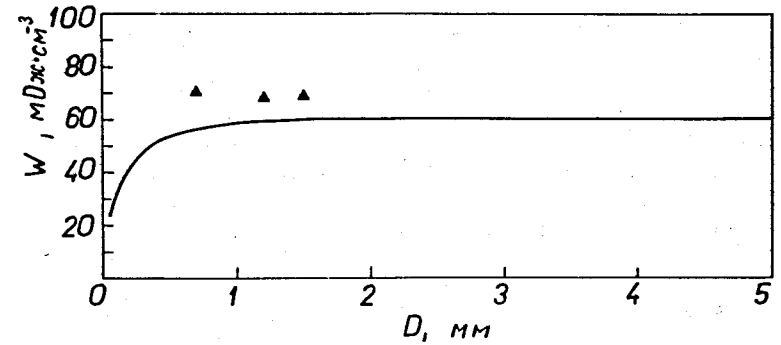


Рис.3. Расчетная зависимость потерь  $W$  [МДж/см<sup>3</sup>] композитного сверхпроводника в адиабатических условиях от диаметра провода  $D$  /мм/, при  $V_M = 5$  Т и  $V_M/\tau = 3$  Т/с. При расчете использованы параметры образца №2 / $\phi 1,2$  мм/. Приведены экспериментальные токи образцов диаметром 0,7; 1,2 и 1,5 мм. /Бóльшие потери для провода  $\phi 0,7$  мм обусловлены  $T_c = 9,6$  К/.

гичны характеру зависимостей, представленных на рис.1 и 2 для образца диаметром 1,2 мм.

#### РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для расчета на ЭВМ энергетических потерь создана программа, в которой учитывается реальная зависимость критической плотности тока и теплоемкости сверхпроводника как от индукции магнитного поля, так и от температуры. Расчет потерь проводится по формуле, которая верна при полном проникновении магнитного поля в объем сверхпроводника, и скорости изменения магнитного поля выше критической. В этом случае многожильный сверхпроводник можно рассматривать как одножильный с диаметром  $\lambda^{1/2} \cdot D$ , где  $D$  - диаметр многожильного сверхпроводника,  $\lambda$  - коэффициент его заполнения. При изменении поля на величину  $dB$  в сверхпроводнике выделяются удельные потери  $dW^{1/}$ :

$$dW = \frac{2}{3\pi} \cdot \lambda^{1/2} \cdot D \cdot J_c(B, T) dB, \quad /4/$$

где  $J_c(B, T)$  - критическая плотность тока в жилах сверхпроводника. Эти удельные потери при изменении поля на величину  $dB$  в адиабатических условиях и при наличии идеального теплового контакта между жилами и матрицей повышают температуру ком-

позита на величину  $dT$ , которая находится из дифференциального уравнения, приведенного в работе <sup>1/</sup>. Полные потери определяются суммированием полученных приращений  $dW$  в интервале изменения поля от  $V_M$  до нуля и, соответственно, температуры образца от 4,2 К до  $T_{max}$ . Точность расчета вытекает из правильности определения свойств сверхпроводника, т.е. критической температуры, теплоемкости и критической плотности тока.

Результаты расчетов приведены на рис.2 и 3.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Величина потерь и характер их зависимости от амплитуды индукции магнитного поля  $V_M$  в адиабатических условиях значительно отличаются от соответствующих величин потерь и зависимостей в изотермических условиях. Для наглядности на рис.2 приведена кривая потерь в изотермических условиях.

На кривой зависимости потерь в адиабатических условиях от величины  $V_M$  при  $\sim 1,5 T$  /рис.2/ наблюдается насыщение. Причиной такого поведения является наличие обратной связи между выделяющимися потерями и величиной прироста температуры. При выделении энергии  $dW$  температура образца увеличивается на  $dT$ , что влечет за собой падение критической плотности тока  $J_c(V, T)$  /несмотря на то, что магнитное поле за это время падает на  $dV$  /. Из-за этого, в свою очередь, уменьшается дальнейшее выделение потерь, которые пропорциональны  $J_c(V, T)$  /см. формулу /4//. Правильность приведенных выше рассуждений подтверждают расчеты. При этом температура образца не достигает критической, а только приближается к ней. По мере приближения температуры к  $T_c$ ,  $J_c(V, T)$  приближается к нулю, и выделяющаяся мощность потерь  $dW/dt$  также стремится к нулю. Наличием обратной связи можно объяснить очень слабую зависимость удельных потерь от диаметра провода  $D$ .

На рис.3 приведена расчетная кривая зависимости удельных потерь от диаметра композитного сверхпроводника. При расчете исходили из данных ( $T_c$ ,  $C(T)$ ,  $J_c(V, T)$ ) для образца диаметром 1,2 мм. На том же рисунке приведены экспериментальные значения удельных потерь для всех трех образцов. Некоторое отличие экспериментальных точек от характера расчета обусловлено разницей в свойствах образцов.

Экспериментальные результаты и расчеты показывают, что наиболее важными параметрами, влияющими на величину потерь в адиабатических условиях, являются критическая температура образца и его теплоемкость.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработана методика измерения и расчета потерь композитных сверхпроводников в адиабатических условиях.

2. Измерены энергетические потери композитных сверхпроводников диаметром 0,7; 1,2 и 1,5 мм в зависимости от амплитуды индукции поперечного магнитного поля  $V_M \leq 5 T$  и начальной скорости падения поля  $V_M/\tau \leq 5 T/c$ .

3. Экспериментальные и теоретические результаты показали значительную разницу как по величине, так и в характере зависимости потерь в адиабатических условиях по сравнению с потерями в изотермических условиях.

4. При значениях амплитуды магнитного поля  $V_M$  выше некоторой величины потери в адиабатических условиях практически не зависят от амплитуды.

5. Величинами, решающим образом определяющими величину потерь в адиабатических условиях, являются  $T_c$ ,  $J_c(V, T)$ ,  $C(T)$ .

Авторы выражают благодарность П.Василеву за измерение температурной зависимости удельной теплоемкости композитного образца.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Luppov V.G. et al. Cryogenics, 1980, vol.20, No.10, p.571.
2. Kabat D. et al. Cryogenics, 1979, vol.19, No.7, p.382.
3. Никулин А.Д. и др. В кн.: Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости. Крым, Алушта, 1975. Атомиздат, М., 1977, т.4, с.5.
4. Леяровски Е. и др. В кн.: Сб. аннотаций трудов 18-го Всесоюзного совещания по физике низких температур. Киев, сентябрь, 1974. Изд-во ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1974, с.93.
5. Superconducting Application Group, RHEL Preprint RPP/A 73, 1969, Chilton, UK.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 февраля 1981 года.