

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3227/82

12/7-82

P8-82-218

Д.Кабат, В.Г.Лушов

СТАБИЛЬНОСТЬ И СКОРОСТЬ ПЕРЕХОДА  
В НОРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ  
ОБМОТОК СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ  
ВСЛЕДСТВИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ  
ПРИ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ

Направлено в журнал "Cryogenics"

1982

При эвакуации запасенной энергии из сверхпроводящего магнита /СМ/ в обмотке под воздействием быстро падающего магнитного поля возникают энергетические потери. Из-за малых характерных времен процесса в СМ с высокой плотностью тока потери возникают в условиях, близких к адиабатическим. Они могут оказать существенное влияние как на стабильность обмотки при запланированной эвакуации энергии /например, в накопителях/, так и на характер переходных процессов в случае аварийной эвакуации при переходе СМ в нормальное состояние. Криостатически нестабилизированные обмотки, как это было теоретически и экспериментально показано в работе<sup>/1/</sup>, в процессе эвакуации могут переходить в нормальное состояние из-за нагрева, вызываемого потерями.

В ряде случаев скорость распространения нормальной зоны в обмотке СМ намного превышает скорость ее распространения в результате тепловой диффузии. Например, экспериментально определенная в работе<sup>/2/</sup> величина этой скорости на два порядка выше, чем рассчитанная в той же работе по модели одномерного распространения тепла в обмотке. Авторы отмечают, что причиной такого различия могут быть энергетические потери, возникающие в сверхпроводнике.

В работе<sup>/3/</sup> автор указывает, что гистерезисный нагрев сверхпроводника - вполне вероятное объяснение прогрессирующего увеличения скорости распространения нормальной фазы в некоторых сверхпроводящих системах в течение перехода. Особенно, как отмечает автор, это относится к проводникам с большими потерями, связанными, например, с большим шагом скрутки нитей или высокой скоростью изменения поля при переходе.

В результате быстрого роста омического сопротивления обмотки СМ, с одной стороны, падает эффективность эвакуации, а с другой стороны, уменьшается опасность локального перегрева проводника. Для снижения локального нагрева в ряде случаев принимаются меры, ведущие к быстрому равномерному разогреву обмотки СМ, например с помощью импульсного нагревателя<sup>/4/</sup>. Однако это создает дополнительные трудности при конструировании и изготовлении СМ и, кроме того, усложняет схему управления. Необходимый в данном случае равномерный разогрев обмотки мог бы при определенных условиях происходить вследствие выделяющихся во время эвакуации в композитном сверхпроводнике энергетических потерь.

В данной работе приводятся результаты теоретических исследований влияния энергетических потерь на стабильность и на скорость перехода в нормальное состояние обмоток постоянных магнитов с высокой средней плотностью тока при эвакуации запасенной энергии. Показано, что при определенных условиях потери могут эффективно переводить такие обмотки в нормальное состояние. Проведена оценка скорости перехода обмоток. Получена величина, превышающая скорость распространения нормальной зоны за счет тепловой диффузии на  $2 \div 3$  порядка. Выработаны конкретные рекомендации с целью создания возможности существенного влияния на характер процесса перехода СМ.

## 1. КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В многожильных сверхпроводниках под действием изменяющегося магнитного поля возникают вихревые и гистерезисные потери. По мере увеличения скорости изменения поля ( $\dot{B}$ ) ток, индуцированный во внешних жилах, достигает критического значения, и поле внутри композитного проводника начинает существенно экранироваться этими токами. При скоростях изменения поля, больших чем  $\dot{B}_c^*$ <sup>/5/</sup>,

$$\dot{B}_c^* = \rho_e \cdot J_c(B, T) \cdot \lambda \cdot D / \ell_p^2 \quad /1/$$

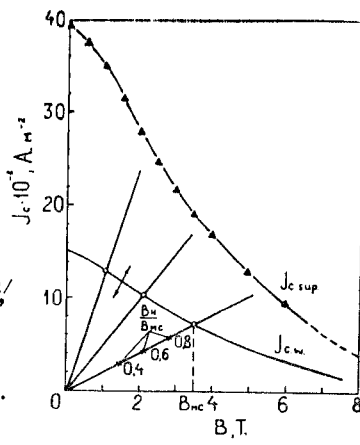
( $\rho_e$  - поперечное удельное сопротивление композита,  $J_c(B, T)$  - критическая плотность тока в жилах сверхпроводника,  $\lambda$  - коэффициент заполнения провода сверхпроводником,  $D$  - диаметр провода,  $\ell_p$  - шаг твиста) происходит насыщение многожильного композитного проводника. В этом случае потери в нем можно вычислять, как в одножильном сверхпроводнике диаметром  $D$  с эффективной критической плотностью тока  $\lambda \cdot J_c(B, T)$ <sup>/6/</sup>. Прирост потерь на единицу объема проводника при изменении индукции поля на величину  $dB$  не зависит от скорости изменения поля  $\dot{B}$  и определяется выражением

$$dW = \frac{2}{3\pi} \cdot \lambda \cdot J_c(B, T) \cdot D \cdot [1 + k(J_{tr}(t)/J_c(B, T))^2] \cdot dB, \quad /2/$$

где  $J_{tr}(t)$  - плотность транспортного тока,  $k$  - коэффициент, зависящий от геометрии провода<sup>/7/</sup>. В частности, для многожильных сверхпроводников круглого сечения  $k \approx 1$ <sup>/8/</sup>.

Проведем оценку абсолютных величин  $\dot{B}_c^*$  для различных композитных  $Nb_{0,5}Ti_{0,5}$  сверхпроводников в медной матрице. Поперечное удельное сопротивление этих проводников ( $\rho_e$ ) практически не зависит от сопротивления меди /из-за наличия высоко-резистивного барьера между матрицей и сверхпроводящими жилами/<sup>/9/</sup>, а определяется диаметром жил  $d$ <sup>/10,11/</sup> и величиной магнитного поля<sup>/9,12/</sup>. Для расчета  $\dot{B}_c^*$  воспользуемся эксперименталь-

Рис.1. Характерная зависимость  $J_{c, \text{суп}}(B)$  в жилах композитного сверхпроводника  $Nb_{0,5}Ti_{0,5}$ .  $J_{c, \text{н}} -$  средняя критическая плотность тока в обмотке соленоида  $/D=1,2 \text{ мм}; \lambda=0,5; \Delta=0,05 \text{ мм}/$ .



ной зависимостью  $\rho_e(d)$ , полученной в работах <sup>10,11/</sup>. Зависимость  $\rho_e(B)$ , исходя из экспериментальных данных <sup>9,12/</sup>, мы приближенно аппроксимировали выражением

$$\rho_e(d, B) = \rho_e(d) \cdot (1 + 0,35 \cdot B) \quad [ \text{Ом} \cdot \text{м}; \text{T} ] \quad /3/$$

Таким образом, выражение /1/ для изотермических условий принимает вид:

$$\dot{V}_c^* = \sigma(d, B) \cdot D \cdot \lambda / \ell_p^2 \quad /4/$$

где

$$\sigma(d, B) = \rho_e(d) \cdot J_c(B) \cdot (1 + 0,35 \cdot B) \quad /5/$$

В качестве  $J_c(B)$  выбираем характерную зависимость для  $Nb_{0,5}Ti_{0,5}$  <sup>13/</sup>, представленную на рис.1. Полученная зависимость  $\sigma$  от индукции магнитного поля для различных диаметров сверхпроводящих жил изображена на рис.2а.

Таким образом, выбирая для данного проводника величину  $\sigma(d, B)$ , по формуле /4/ можно оценить величину критической скорости изменения магнитного поля. На рис.2б в качестве примера представлена зависимость  $\dot{V}_c^*$  от шага твиста для магнитного поля 5Т  $/D=1,0 \text{ мм}; \lambda=0,5/$ .

В СМ постоянного тока, как правило, применяются слабо твистированные многожильные сверхпроводники, для которых условие  $\dot{V} > \dot{V}_c^*$  обычно выполняется, то есть прирост потерь определяется выражением /2/.

## 2. СТАБИЛЬНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ И ПОТЕРИ В АДИАБАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПРИ НАЛИЧИИ ТРАНСПОРТНОГО ТОКА

В работах <sup>13,14/</sup> изучались энергетические потери в композитных проводниках в адиабатических условиях при экспоненциальном падении поля от максимальной величины  $B_M$  до нуля без транспортного тока. Исследованы зависимости потерь от различных свойств и параметров проводника  $(D, \lambda, T_c, J_c(B, T))$ . Как показывают полученные результаты, если вихревые потери в чехле матрицы достаточно малы, то сверхпроводник без транспортного то-

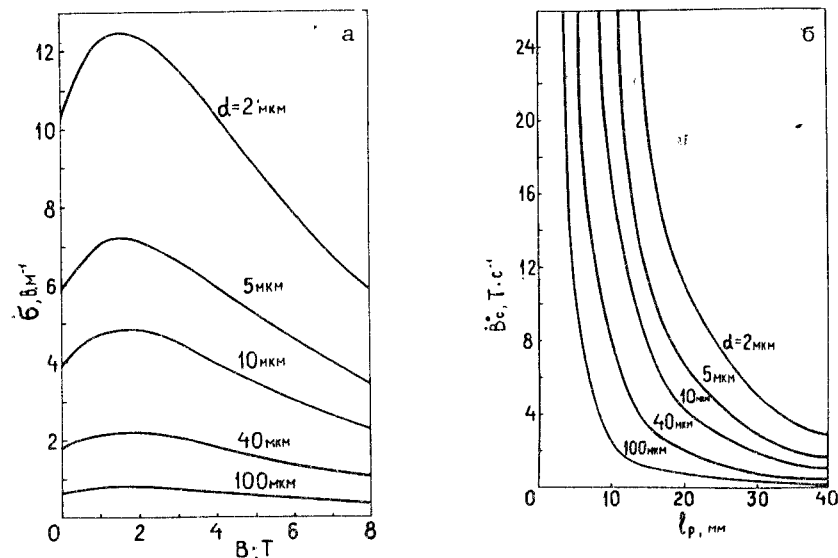


Рис.2. а/ Зависимость коэффициента  $\sigma$  /см. формулу /5// от индукции магнитного поля для различных диаметров сверхпроводящих нитей d. б/ Зависимость критической скорости изменения магнитного поля от шага твиста для различных диаметров сверхпроводящих нитей  $/B=5 \text{ Т}; D=1,0 \text{ мм}; \lambda=0,5/$ .

ка не переходит в нормальное состояние из-за наличия обратной связи между ростом температуры и мощностью выделяемых потерь. По мере приближения температуры к  $T_c$  критическая плотность тока стремится к нулю и, как следствие, мощность потерь, пропорциональная  $J_c(B, T)$ , также стремится к нулю. Температура сверхпроводника приближается к критической, но не достигает ее  $/\Delta T > 0,15 \text{ К}/$  <sup>13/</sup>.

Картина может измениться, если по сверхпроводнику течет транспортный ток. Рассмотрим случай, когда плотность транспортного тока в проводнике  $J_{tr}(t)$  изменяется во времени синхронно с магнитным полем, т.е.

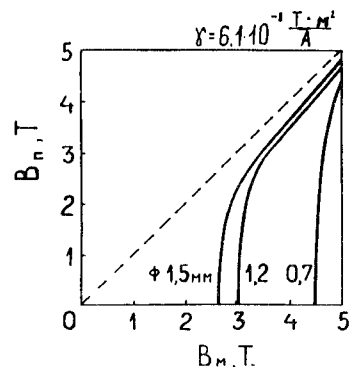
$$B(t) = \gamma \cdot J_{tr}(t) \quad /6/$$

Пусть транспортный ток и, следовательно, магнитное поле падают по закону, близкому к экспоненциальному, от максимальной величины до нуля/случай изменения поля при эвакуации энергии из СМ на омическое сопротивление/:

$$B(t) = B_M \cdot e^{-\gamma t} \quad , \quad t = L/R(t) \quad /7/$$

где L - индуктивность обмотки СМ; R(t) - полное активное сопротивление цепи, определяющееся гасительным сопротивлением

Рис. 3. Зависимость полей перехода композитных сверхпроводников (различных диаметров) с транспортным током от максимального значения индукции магнитного поля.



$R_0$  и меняющимся во времени сопротивлением обмотки СМ  $\gamma(t)$ .

В этом случае сверхпроводник может перейти в нормальное состояние, если критический ток /уменьшающийся за счет роста

температуры несмотря на падение магнитного поля/ сравняется с транспортным током /падающим во время эвакуации/.

Стабильность обмотки зависит от коэффициента связи плотности транспортного тока и магнитного поля  $\gamma$ /см. формулу /6//.

В качестве примера проведен расчет энергетических потерь в композитных проводниках при адиабатических условиях с характерным коэффициентом  $\gamma = 6,1 \cdot 10^{-8} \text{ T}/(\text{A}/\text{м}^2)^{1/2}$ . При этом мы использовали формулу /2/ и методику расчета, описанную ранее /1,14/.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости полей перехода  $B_{II}$  композитных сверхпроводников различных диаметров /с параметрами  $T_c = 9,4 \text{ K}$ ;  $\lambda = 0,5$ ;  $J_c(B)$  - см. рис. 1;  $\gamma =$

$= 6,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{T}}{\text{A}/\text{м}^2}$  / от максимального значения индукции магнитного

поля  $B_M$ . То есть при падении поля от максимальной величины  $B_M$  проводник переходит в нормальное состояние при поле  $B_{II}$ . Так как  $B > B_c^*$ , то поле перехода не зависит от скорости падения.

Из рис. 3 видно, что проводники с большим диаметром раньше переходят в нормальное состояние. Аналогичные вычисления показывают, что с увеличением  $\lambda$  наблюдается тенденция к более раннему переходу сверхпроводника. В качестве примера на

рис. 4а представлены зависимости потерь от величины максимального магнитного поля  $B_M$  для типичного композитного сверхпроводника диаметром 1,2 мм с транспортным током и без него.

Пунктирной кривой обозначены потери при переходе сверхпроводника в нормальное состояние, причем в этом случае потери вычислялись в интервале изменения поля от максимального значения  $B_M$  до индукции  $B_{II}$  в момент перехода.

Зависимости энергетических потерь в случае перехода проводника с транспортным током от  $\lambda$  и  $D$ , как и в случае без транспортного тока /14/, имеют насыщения. В качестве примера на рис. 4б представлены расчетные зависимости  $W=f(D)$  для образца с указанными типичными параметрами /с транспортным током и без него/.

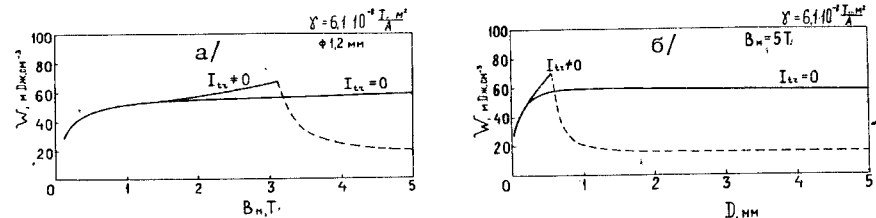


Рис. 4. Зависимость потерь в композитном сверхпроводнике а/ от величины максимального магнитного поля; б/ от диаметра проводника. Сплошные кривые - без перехода в нормальное состояние, пунктирные кривые - до перехода в нормальное состояние.

Изменение таких физических параметров сверхпроводника, как критическая температура ( $T_c$ ) и критическая плотность тока ( $J_c$ ), не влияет существенным образом на переход сверхпроводника, хотя наблюдается незначительная тенденция к более раннему переходу при увеличении  $J_c$  и уменьшении  $T_c$ .

### 3. ПЕРЕХОД ОБМОТКИ БЕСКОНЕЧНО ДЛИННОГО СОЛЕНОИДА ИЗ-ЗА ПОТЕРЬ ПРИ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим бесконечно длинный плотный /без каналов для жидкого гелия/ соленоид с максимальным полем в апертуре  $B_{MC}$ . Пусть этому значению поля соответствует критический ток соленоида  $I_{c0}$ . Предположим, что соленоид намотан из провода с исходными параметрами:  $D, \lambda, T_c, J_c(B), B_{c2}$ . Толщина межслоевой изоляции  $\Delta$ . Средний коэффициент заполнения обмотки проводом  $\lambda_w$  определяется из следующего выражения:

$$\lambda_w = \pi D / 4(D + \Delta). \quad /8/$$

Средняя критическая плотность тока в обмотке равна:

$$J_{cw}(B) = J_c(B) \cdot \lambda \cdot \lambda_w, \quad /9/$$

где  $J_c(B)$  - критическая плотность тока сверхпроводящих жил /см. рис. 1/. Толщина обмотки соленоида определяется из выражения

$$Q = \frac{B_{MC}}{\mu_0 \cdot J_{cw}(B_{MC})} = \frac{4 B_{MC}(D + \Delta)}{\mu_0 \cdot J_c(B_{MC}) \cdot \lambda \cdot \pi \cdot D}. \quad /10/$$

Рассмотрим влияние потерь на стабильность обмотки при эвакуации энергии и на скорость перехода соленоида в нормальное состояние. Предположим, что условие  $B > B_c^*$  выполнено, т.е. выделяющиеся в обмотке потери не зависят от  $B$  и определяются выражением /2/. Из-за малых характерных времен процесса предполагаем, что энергия в плотной обмотке выделяется в адиабатических условиях.

Пусть в обмотку заведен ток  $I < I_c$ , при котором индукция магнитного поля в апертуре  $B_H = V_{MC} \frac{I}{cm}$  /рис.1/. Если эвакуация энергии проводится на гасительное сопротивление  $R_0$ , то поле и транспортный ток будут падать в соответствии с формулой /7/. Зная распределение магнитного поля по обмотке /линейно падающее от  $B_H$  на внутренней стороне до нуля на внешней/, мы согласно описанной ранее процедуре вычисления перехода сверхпроводника в нормальное состояние /1/ провели расчеты для различных радиальных координат соленоида.

Рассмотрим в качестве примера характерный соленоид, намотанный из композитного проводника с  $Nb_{0,5}Ti_{0,5}$  жилами в медной матрице. Пусть сверхпроводник имеет следующие параметры:  $B_{c2} = 10,1$  Т;  $T_c = 9,4$  К;  $J_c(B)$ , изображенное на рис.1;  $D = 1,2$  мм;  $\lambda = 0,5$ ;  $\Delta = 0,05$  мм. Зависимость  $J_{cw}(B)$  также представлена на рис.1.

На рис.5 приведена зависимость относительной величины поля перехода  $B_H/V_{MC}$  от относительной радиальной координаты обмотки  $R/Q$  ( $R/Q = 0$  соответствует внутреннему радиусу обмотки) для различных начальных значений поля  $B_H$ .

Видно, что чем ближе начальное поле к критическому, тем большая часть обмотки переходит в нормальное состояние. Для  $B_H = V_{MC}$  при эвакуации в нормальное состояние переходит около 90% всей обмотки. Отметим, что при расчете мы пренебрегали теплоемкостью межслоевой изоляции, по нашим оценкам, процесс протекает адиабатически внутри композитного проводника.

Проведены расчеты влияния различных факторов на стабильность обмоток СМ. На рис.6 представлены зависимости пере-

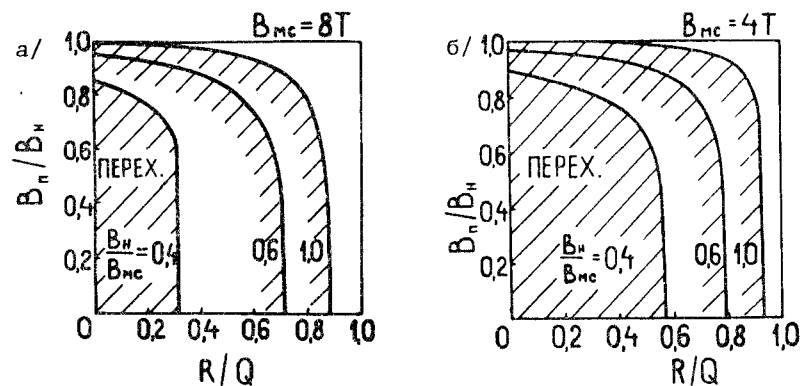


Рис.5. Зависимость относительного поля перехода сверхпроводника в нормальное состояние от относительной толщины переходящей части обмотки бесконечно длинного соленоида. а/  $V_{MC} = 8$  Т, б/  $V_{MC} = 4$  Т.

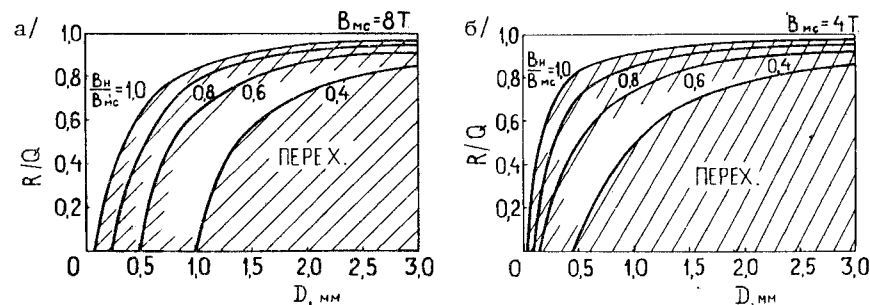


Рис.6. Зависимость относительной части обмотки, переходящей в нормальное состояние, от диаметра провода для бесконечно длинного соленоида. а/  $V_{MC} = 8$  Т; б/  $V_{MC} = 4$  Т.

ходящей в нормальное состояние части обмотки от диаметра провода при неизменных остальных параметрах для бесконечно длинных соленоидов с различными критическими полями  $V_{MC}/V_{MC}$  в качестве параметра выбрано относительное значение начального поля перед эвакуацией  $B_H/V_{MC}$ . Видно, что с увеличением диаметра провода увеличивается часть обмотки, переходящая в нормальное состояние. Так, например, если соленоид с критическим полем  $V_{MC} = 8$  Т намотан из провода диаметром  $0,2$  мм или меньше, то при  $B_H = 0,8 V_{MC}$  он вообще не перейдет при эвакуации в нормальное состояние. Если же выбрать  $D = 1$  мм, то в нормальное состояние перейдет около 80% обмотки. Такая сильная зависимость от диаметра обусловлена тем, что приращение потерь пропорционально  $D/cm$  /2// и, несмотря на то, что абсолютные величины потерь от начала эвакуации до момента перехода при  $D \geq 1$  мм практически не изменяются /см. рис.4б/, динамика разогрева /14/ такова, что поле перехода в значительной степени определяется диаметром проводника.

Из сравнения рис.6а и 6б видно, что с возрастанием  $V_{MC}$  при данном диаметре уменьшается относительная часть обмотки, переходящая в нормальное состояние. На рис.7 представлены расчетные зависимости части обмотки соленоида /  $V_{MC} = 8$  Т /, переходящей в нормальное состояние, от коэффициента заполнения композитного проводника для двух различных начальных значений ( $B_H$ ). В качестве параметра выбран диаметр провода. Из рисунка видно, что с увеличением коэффициента заполнения  $\lambda$  увеличивается часть обмотки, переходящая в нормальное состояние.

Эта относительная часть не зависит от толщины межслоевой изоляции, поскольку при увеличении  $\Delta$  не изменяется относительное распределение магнитного поля по толщине обмотки.

Таким образом, если необходимо изготовить соленоид, который должен при эвакуации равномерно переходить в нормальное

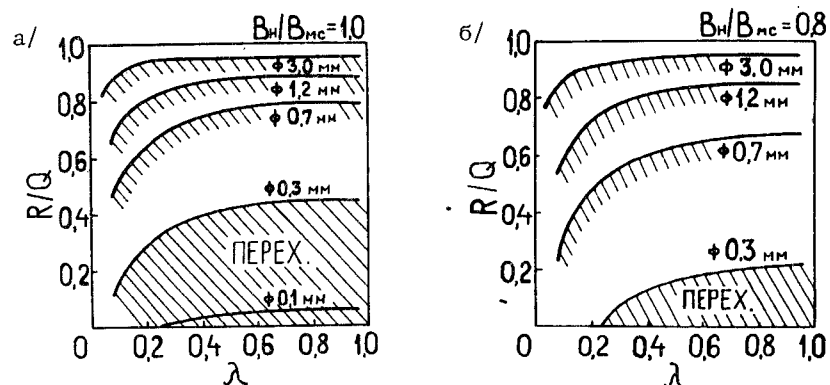


Рис. 7. Зависимость части обмотки, переходящей в нормальное состояние, от коэффициента заполнения композитного сверхпроводника для бесконечно длинного соленоида  $V_{MC}=8$  Т, а/ начальное поле  $V_H=8$  Т, б/  $V_H=6,4$  Т.

состояние, то необходимо выбирать проводник с максимально возможными диаметром и коэффициентом заполнения.

#### 4. ПЕРЕХОД В НОРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ОБМОТОК СОЛЕНОИДОВ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Рассмотрим влияние потерь на стабильность обмоток трех характерных соленоидов при эвакуации энергии. Пусть все три соленоида имеют апертуру диаметром  $2a_1=50$  мм, максимальное поле в центре апертуры  $V_{MC}=8$  Т, критический ток  $J_c=225$  А. Предположим, что все они намотаны из композитного  $Nb_{0,5}Ti_{0,5}$  провода диаметром 1,2 мм со следующими свойствами и параметрами:  $T_c=9,4$  К;  $\lambda=0,5$ ;  $l_p=25$  мм;  $J_c(B)$  представлена на рис. 1;  $\Delta=0,05$  мм. Остальные параметры соленоидов даны в таблице:

Таблица

Соленоид	$a_2$ [мм]	$b$ [мм]	$\alpha$	$\beta$	$V_{MC}$ [Т]	$N$	$L$ [Гн]	$V_{макс}$ [Т/с]
1. Оптимальный	85	50	3,40	2,00	7,72	4000	0,81	21
2. Высокий	67,5	150	2,70	6,00	7,64	8500	1,32	13
3. Низкий	160	25	6,40	1,00	7,89	4500	2,42	7

Здесь  $a_2$  и  $2b$  - внешний радиус и высота обмотки соответственно;  $\alpha = \frac{a_2}{a_1}$  и  $\beta = \frac{b}{a_1}$  - относительные размеры обмотки соленоида.

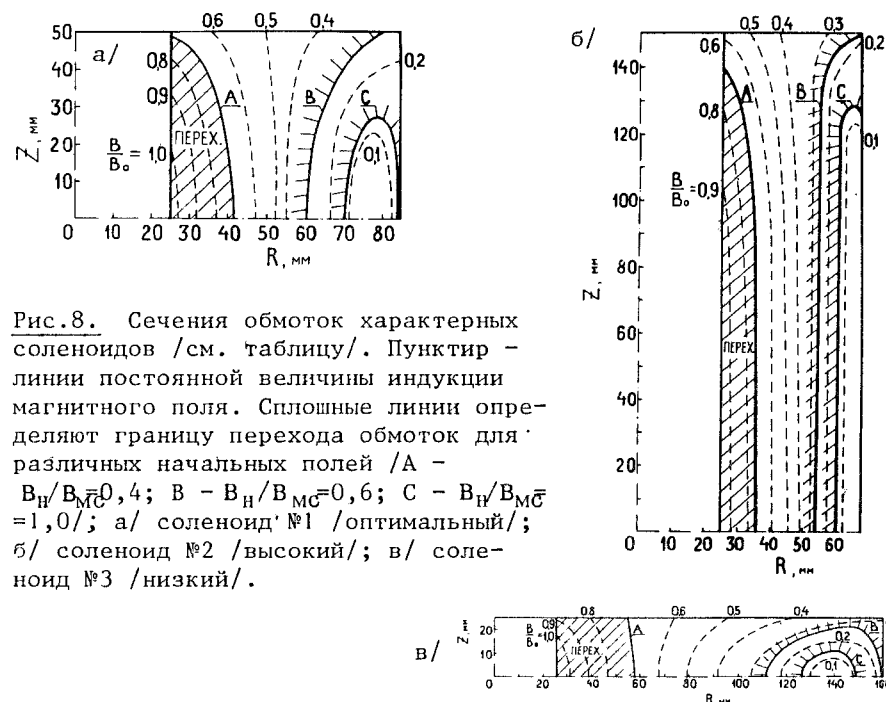


Рис. 8. Сечения обмоток характерных соленоидов /см. таблицу/. Пунктир - линии постоянной величины индукции магнитного поля. Сплошные линии определяют границу перехода обмоток для различных начальных полей /А -  $V_H/V_{MC}=0,4$ ; В -  $V_H/V_{MC}=0,6$ ; С -  $V_H/V_{MC}=1,0$ /; а/ соленоид №1 /оптимальный/; б/ соленоид №2 /высокий/; в/ соленоид №3 /низкий/.

да;  $N$  - количество витков в обмотке;  $L$  - индуктивность обмотки;  $V_{макс}$  - максимально допустимая скорость изменения индукции магнитного поля во время эвакуации энергии при допустимом напряжении на концах обмотки 500 В.

На рис. 8 схематически представлены сечения этих трех обмоток. Пунктиром обозначены линии постоянного значения индукции магнитного поля. Сплошные линии определяют границу перехода соленоидов при эвакуации для различных начальных значений  $V_H$ . Видно, что для данных характерных соленоидов потери могут весьма эффективно переводить в нормальное состояние большую часть обмотки.

#### 5. СКОРОСТЬ ПЕРЕХОДА ОБМОТОК В НОРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗ-ЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Зная динамику перехода сверхпроводника и учитывая реальные размеры соленоидов, можно оценить скорость перехода обмоток  $V_H$  [м/с] в нормальное состояние. Для проведения этих оценок предположим, что поле падает от  $V_H$  с некоторой постоянной скоростью  $V > V_0^*$ . Тогда за время  $\Delta t$  поле изменится на величину  $\Delta V = (V_H - V \cdot \Delta t)$ . Подсчитав, какая часть обмотки перейдет в

нормальное состояние из-за потерь при изменении поля на  $\Delta B$ , можем оценить среднее значение  $V_{II}$  в интервале  $\Delta t$ . Устремляя  $\Delta t$  к нулю, получаем мгновенное значение скорости.

На рис. 9 представлена динамика относительной скорости перехода в нормальное состояние обмотки бесконечно длинного соленоида  $B_{MC} = 8$  Т/при различных начальных значениях поля. Здесь  $V_{II \text{ макс}}$  - скорость в начальный момент перехода обмотки. Например, для  $B_H = 0,6 B_{MC}$  внутренний слой обмотки переходит в нормальное состояние при  $B_{II} = 0,95 B_H$  /см. рис. 5а/; в этот момент времени скорость перехода максимальна и затем достаточно быстро падает. Из рис. 5 видно, что большая часть обмотки переходит в нормальное состояние в начале процесса эвакуации. Поэтому рассчитаем среднюю скорость перехода обмотки за счет потерь в начальный период эвакуации, а именно, в интервале изменения поля от  $B_H$  до  $0,8 B_H$ .

Рассчитав по изложенной выше методике часть обмотки, перешедшей в нормальное состояние при падении поля на  $\Delta B = 0,2 B_H$ , можем вычислить длину сверхпроводника, перешедшего при этом в нормальное состояние ( $l_N$ ). Если эвакуация производилась с постоянной скоростью  $V$ , то время, за которое поле упало на 20%

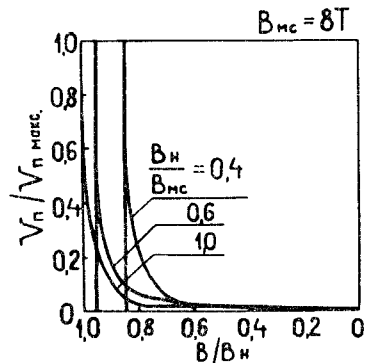
Рис. 9. Динамика относительной скорости перехода в нормальное состояние обмотки бесконечно длинного соленоида  $B_{MC} = 8$  Т/при различных относительных начальных значениях поля.  $V_{II \text{ макс}}$  - скорость в начальный момент перехода обмотки.

от своей первоначальной величины, определяется из выражения  $t = 0,2 B_H / V$ , и тогда скорость перехода обмотки в нормальное состояние определяется по формуле

$$V_{II} = \frac{l_N}{t} = \frac{l_N \cdot B}{0,2 \cdot B_H} \left[ \frac{м}{с} \right]. \quad //11/$$

Результаты расчета представлены на рис. 10.

Полученные значения на несколько порядков превышают характерные скорости распространения нормальной зоны за счет тепловой диффузии /см., например, <sup>15/</sup>/. Причем сделанная выше оценка средней скорости занижена, т.к. при переходе соленоида увеличивается активное сопротивление цепи, возрастает ско-



рость падения магнитного поля и, как следствие, еще более растет скорость перехода обмотки в нормальное состояние.

На лабораторном многосекционном соленоиде, описанном в работе <sup>2/</sup>, были проведены эксперименты по определению скорости перехода обмотки в нормальное состояние при эвакуации энергии. Полученные цифры по порядку величины совпадают с проведенным выше расчетом. Так, для начального поля  $B_H = B_{MC} = 8$  Т и скорости эвакуации  $V = 6,3$  Т/с, скорость перехода  $V_{II} \approx 25$  км/с. Экспериментальные скорости могли получиться выше расчетных за счет того, что в нормальное состояние одновременно переходили сразу несколько секций соленоида.

Таким образом, становится очевидным, что энергетические потери могут весьма эффективно переводить обмотки в нормальное состояние. Вопрос, нужен или не нужен такой переход обмотки, необходимо, по-видимому, решать в каждом конкретном случае отдельно.

**Выводы:** 1/ Исследовано влияние транспортного тока на энергетические потери в композитных сверхпроводниках в адиабатических условиях. Показано, что эти потери могут переводить проводник с транспортным током в нормальное состояние.

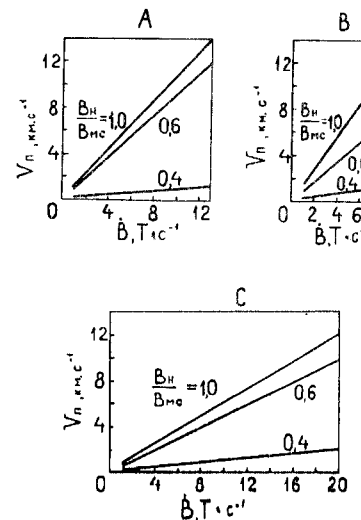


Рис. 10. Зависимость средней скорости перехода обмоток в нормальное состояние от скорости изменения магнитного поля при эвакуации энергии /ограниченной максимальным напряжением на концах соленоидов 500 В/ при различных начальных значениях поля. А/ - соленоид №1 /оптимальный/; В/ - соленоид №2 /высокий/; С/ - соленоид №3 /низкий/.

2/ Проведен расчет динамики перехода в нормальное состояние обмотки бесконечно длинного плотного соленоида из-за энергетических потерь при эвакуации энергии. Показано, что

как правило, для большей части обмотки этот переход осуществляется в начале процесса эвакуации.

3/ Исследовано влияние свойств и параметров проводника на стабильность обмоток при эвакуации энергии. Часть обмотки, переходящая в нормальное состояние, возрастает при увеличении диаметра и коэффициента заполнения проводника.

4/ Проведен расчет динамики перехода трех характерных соленоидов  $/B \approx 8 \text{ Т.}/$  при эвакуации энергии.

5/ Проведены оценки скоростей перехода в нормальное состояние плотных обмоток при эвакуации энергии. Полученные величины превышают характерные скорости распространения нормальной зоны за счет тепловой диффузии на 2-3 порядка. Эксперименты, проведенные на лабораторном соленоиде, подтверждают правильность полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Luppov V.G. et al. Cryogenics, 1980, 20, p. 571.
2. Kabat D. et al. Cryogenics, 1979, 19, p. 382.
3. Mulhall B.E. Cryogenics, 1976, 16, p. 113.
4. Stiening R. et al. Proc. Applied Superconductivity Conf., Pittsburgh, 1978, p. 670.
5. Superconducting Magnet Group, RHEL Preprint RPP/A 73, Chilton, 1969, p.33.
6. Hlasnik I. Proc. 6-th Int. Conf. Magnet Technology, Bratislava, 1977, p. 575.
7. Shen S.S., Schwall R.E. IEEE Transaction on Magnetics, Vol. MAG-15, 1979, No.1, p. 232.
8. Murphy J.H., Walker M.S. Advances in Cryogenics Engineering, vol.24, Plenum Press, N.Y., 1978, p. 406.
9. Drobin V.M. et al. Cryogenics, 1982, 22, p. 115.
10. Turck B. et al. Cryogenics, 1977, 17, p. 217.
11. Davoust M.E., Renard J.C. Proc. ISEC 6 (IPC Science & Technology Press, 1976), p. 458.
12. Polak M., Krempasky L. Internal Report, Electrotechnical Institute, EPRC SAS, Bratislava, 1981.
13. Кабат Д. и др. ОИЯИ, Б1-8-81-558, Дубна, 1981.
14. Kabat D. et al. Cryogenics, 1982, 22, p. 69.
15. Dresner L. et al. Cryogenics, 1976, 16, p. 675.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 марта 1982 года.

Кабат Д., Луппов В.Г. Стабильность и скорость P8-82-218  
перехода в нормальное состояние обмоток сверхпроводящих магнитов вследствие энергетических потерь при эвакуации энергии

Проведены расчеты влияния энергетических потерь на стабильность и скорость перехода в нормальное состояние плотных обмоток сверхпроводящих магнитов /СМ/ при эвакуации энергии. Показано, что при определенных условиях потери могут переводить в нормальное состояние большую часть обмотки. Исследовано влияние свойств и параметров проводников на стабильность и скорость этого перехода. Выработаны конкретные рекомендации для создания возможности существенного влияния на характер процессов перехода СМ. В качестве примера рассмотрены три характерных соленоида с максимальными критическими полями и апертурами  $\approx 8 \text{ Т.}$  Проведены оценки скоростей перехода в нормальное состояние обмоток этих соленоидов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Kabat D., Luppov V.G. Stability and Quench P8-82-218  
Velocity of High-Current Density Superconducting Magnets  
due to Energy Losses During the Energy Removal Process

Theoretical studies have been done of the influence of energy losses on the stability and the quench velocity of high current density superconducting magnets during energy removal. It is shown that under certain conditions the losses can drive normally a large part of the winding. The influence of the properties and parameters of composite superconductors on the stability and the quench velocity was investigated. The recommendations are given to have an influence on those processes. As an example, three solenoids with maximal magnetic field induction in their apertures  $\approx 8 \text{ T}$  are considered. The quench velocities of these three solenoids were estimated.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR,  
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.