

Л-855

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

8-83-639

ЛУППОВ

Владимир Григорьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ  
В ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ ОБМОТОК  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1983

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Ирина Сергеевна  
ХУХАРЕВА

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Игорь Александрович  
ШЕЛАЕВ

кандидат технических наук

Леонид Иосифович  
ГРЕБЕНЬ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, Ленинград.

Защита диссертации состоится "3" ноября 1983 года в 11<sup>00</sup> час. на заседании Специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской обл., конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "29" сентября 1983 года.

Ученый секретарь  
специализированного совета

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

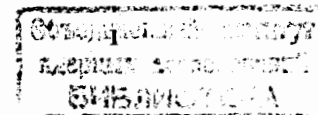
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Дальнейшее развитие экспериментальной базы физики высоких энергий трудно представить сегодня без использования сверхпроводящих магнитных систем (СМС). Сверхпроводимость находит все более широкое применение в новых разработках циклических и линейных ускорителей, каналов для транспортировки ускоренных пучков, высокочастотных резонаторов, магнитов для детекторов заряженных частиц, источников ионов и других элементов физической аппаратуры. Важным достоинством использования СМС является значительное снижение затрат электроэнергии при эксплуатации таких установок. Для импульсных сверхпроводящих магнитов циклических ускорителей уровень тепловыделений в обмотках является одним из самых существенных вопросов экономики их эксплуатации. В связи с этим исследования энергетических потерь в токонесущих элементах, находящихся в переменном магнитном поле, являются неотъемлемой частью любой программы создания сверхпроводящего ускорителя.

Особенностью СМС, используемых в экспериментальных установках физики высоких энергий, является, как правило, их значительные размеры и большие объемные плотности запасенной энергии. Это заставляет уделять самое серьезное внимание безопасности их эксплуатации. Несмотря на то, что в последние годы значительно возросло количество разработок, направленных на обеспечение надежной работы СМС, следует отметить достаточно высокую аварийность таких систем. Результаты некоторых экспериментов указывают на то, что при определенных условиях энергетические потери, выделяющиеся в сверхпроводящих токонесущих элементах при эвакуации энергии, могут существенно увеличивать скорость распространения нормальной зоны в обмотке, предохраняя ее тем самым от локального перегрева. Это увеличение наиболее существенно для "плотных", т.е. без каналов для жидкого гелия, обмоток, когда выделение потерь в проводнике происходит практически без теплоотвода. Вместе с тем, крайне мало работ посвящено исследованию энергетических потерь в адиабатических условиях и изучению их влияния на переходные процессы в обмотках при эвакуации энергии.

Перечисленные обстоятельства делают весьма актуальным проведение исследований энергетических потерь в токонесущих элементах обмоток СМС при различных условиях.

Цель работы. 1) Измерения энергетических потерь в различного типа сверхпроводящих токонесущих элементах диполей в импульсных магнитных полях. 2) Разработка достаточно простого способа измерения удельного поперечного сопротивления композитных сверхпроводников (КС) и изучение свойств этого параметра, определяющего величину вихревых



потерь в проводниках. 3) Разработка методики измерения потерь в адиабатических условиях и измерение потерь в некоторых характерных КС. 4) Экспериментальное исследование условий сохранения стабильности "плотной" обмотки сверхпроводящего лабораторного соленоида при эвакуации энергии и разработка методики расчета влияния потерь на переходные процессы в таких обмотках.

Научная новизна основных результатов диссертации заключается в следующем: 1) Предложен простой способ интегрирования площади петли намагниченности при измерении потерь в сверхпроводниках электрическим способом; экспериментально исследовано неизвестное ранее влияние некоторых факторов формирования образца на величину измеряемых потерь, а именно: коэффициента заполнения образца композитным сверхпроводником, длины КС по сравнению с шагом твиста сверхпроводящих жил. 2) Разработана методика измерения удельного поперечного сопротивления КС; обнаружены сильная зависимость поперечного сопротивления от магнитного поля и большая протяженность переходов поперечного сопротивления в сверхпроводящее состояние по температуре. 3) Разработана методика измерения энергетических потерь в адиабатических условиях; экспериментально исследованы зависимости адиабатических потерь в КС различного типа от амплитуды и скорости изменения магнитного поля. 4) С помощью разработанной приближенной методики расчета рассмотрено влияние потерь на стабильность и переходные процессы в сверхпроводящих соленоидах с высокой плотностью тока при эвакуации энергии.

Практическая ценность и значимость работы. 1) Предложенный способ интегрирования площади петли намагниченности значительно упрощает обработку экспериментальных результатов и в некоторых случаях позволяет производить измерения потерь при существенно больших скоростях изменения магнитного поля. 2) Проведены измерения потерь в различного типа сверхпроводящих токонесущих элементах, помещенных в переменное магнитное поле (исследовано свыше 50 образцов). Результаты этих измерений позволили провести сравнительный анализ различных вариантов обмоточных кабелей, используемых при создании сверхпроводящих импульсных магнитов. 3) Измерения удельного поперечного сопротивления КС по разработанной методике позволяют рассчитывать вихревые потери в проводниках. В некоторых случаях это может избавить исследователей от необходимости создания аппаратуры для измерения потерь и обеспечить значительную экономию жидкого гелия, т.к. измерения поперечного сопротивления можно проводить в транспортном дьюаре с минимальными затратами гелия. 4) Разработанная методика расчета и построенные номограммы перехода КС в нормальное состояние

позволяют производить оценки влияния энергетических потерь на стабильность и переходные процессы в "плотных" обмотках СМС при эвакуации энергии.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах научно-исследовательского криогенного отдела ЛВЭ (1978-1983 гг.), на УП Международной конференции по магнитной технологии (Карлсруэ, 1981), на XX конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур (Вроцлав, 1981), на I Всесоюзном семинаре "Металлофизика сверхпроводников" (Киев, 1981), на XXII Всесоюзном совещании по физике низких температур (Кишинев, 1982), на XII совещании ГДР по физике и технике низких температур (Дрезден, 1983). По материалам выполненных исследований опубликовано 11 печатных работ, приведенных в списке литературы.

Структура и объем диссертации определяются избранной темой. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Материал изложен на 157 страницах машинописного текста, включая 54 рисунка и 6 таблиц. Библиографический список литературы содержит 125 наименований.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает актуальность темы, обосновывает выбор и необходимость изучения рассматриваемых вопросов, отражает научную новизну и краткое содержание диссертации.

Первую главу составляют обзор работ по исследованию энергетических потерь в КС, анализ экспериментальных методов измерения потерь. В ней рассмотрены существующие способы и результаты измерений удельного поперечного сопротивления КС - параметра, определяющего величину вихревых потерь в матрице проводника. Проводится классификация основных способов защиты обмоток СМС и анализируются эксперименты, указывающие на влияние энергетических потерь на стабильность сверхпроводника и характер переходных процессов при эвакуации энергии. В конце главы делаются выводы и излагается постановка задачи данной работы.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию энергетических потерь в различного типа сверхпроводящих токонесущих элементах обмоток импульсных магнитов. Потери измерялись калориметрическим<sup>\*</sup> и электрическим<sup>\*\*</sup> методами. Второй способ, основанный на записи петель намагниченности образца, помещенного в переменное магнитное поле,

\* Дробин В.М. и др. ПТЭ, 1980, № 3, с. 203-205.

\*\* Fietz W.A. The Review of Scient. Instrum., 1965, v.36, No.11, p. 1621-1625.

имеет ряд преимуществ по сравнению с первым. Во время измерений этим методом образец помещается в одной из двух идентичных измерительных катушек, расположенных в апертуре сверхпроводящего диполя. Вторая катушка служит для компенсации индуктивной части сигнала, не связанной с намагниченностью образца. Катушки соединяются навстречу друг другу и сигнал с них через делитель напряжения подается на аналоговый интегратор, напряжение на выходе которого в каждый момент времени изменения внешнего магнитного поля пропорционально среднему значению намагниченности в объеме образца. Подавая на вход "Y" двухкоординатного самописца выходное напряжение интегратора, а на вход "X" напряжение с шунта ( $R_{ш}$ ), включенного последовательно в цепь магнита, получаем в течение цикла изменения поля петлю намагниченности (см. рис. 1а). По площади петли "з" можно вычислить величину потерь в единице объема образца за один цикл:

$$W = \frac{\tau_2 k_M}{\mu_0 k_2 F N_0 A_w} U_Y(I) U_X(I) S,$$

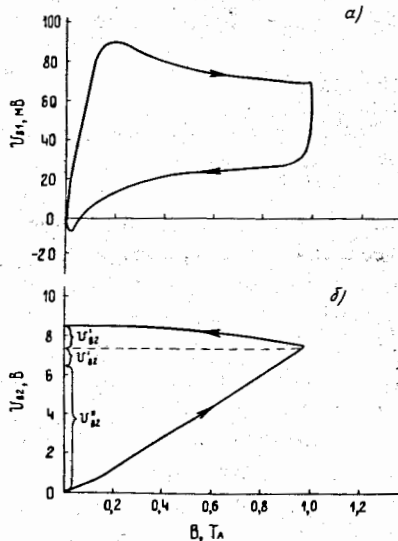


Рис. 1 а) Петля намагниченности КС при треугольном цикле изменения внешнего магнитного поля. б) Сигнал, получаемый при измерении потерь интегрированием площади петли намагниченности.

где  $\tau_2$  — постоянная времени интегратора,  $k_M$  — постоянная связи индукции магнитного поля в апертуре диполя с током в его обмотке,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $k_2$  — геометрический коэффициент,  $F$  — сечение образца в плоскости, перпендикулярной оси измерительной катушки,  $N_0$  — число витков в измерительной катушке,  $U_Y(I)$  и  $U_X(I)$  — чувствительности самописца. Для экспериментального определения  $k_2$ , зависящего от геометрии образца, размеров и взаимного расположения измерительных катушек, поверхностные токи намагниченности образца моделировались токами в медной обмотке катушки с геометрией измеряемого образца; кроме того, проводились контрольные измерения потерь калориметрическим методом.

Главными недостатками описанного способа являются невысокая точность и трудоемкость операции измерения площади петли намагни-

ченности, проводимой обычно планиметром. Нами предложен и успешно использован простой способ интегрирования площади петли намагниченности, позволяющий существенно упростить обработку экспериментальных результатов. Для этого сигнал с выхода первого интегратора подается на вход второго с постоянной времени  $\tau_2$  и после этого на "Y" вход самописца. На "X" вход, как и в первом случае, подается сигнал, пропорциональный индукции магнитного поля в апертуре диполя. При изменении поля  $0 \rightarrow B_M \rightarrow 0$  на самописце получаем картину, представленную на рис. 1б. Площадь петли намагниченности и, следовательно, удельные потери пропорциональны напряжению  $U_{B2}$ . В частности, для сигнала треугольной формы со скоростью нарастания и убывания поля  $\dot{B}$  потери определяются выражением:

$$W = \frac{U_{B2}'' \tau_2 \dot{B}}{\mu_0 k_2 F N_0}$$

При измерениях энергетических потерь методом, основанным на записи петле намагниченности, важным вопросом является способ формирования образца, так как некоторые его параметры могут существенным образом влиять на полученные результаты. Нами экспериментально исследовано влияние некоторых факторов формирования образца на величину измеряемых потерь<sup>[1]</sup>. В частности, показано: 1) разница в намагниченности образцов с различными коэффициентами заполнения их КС ( $k_{30} = v_{КС}/v_{обр.}$ ) в интервале  $k_{30} = 0,250 \div 0,712$  лежит в пределах ошибки измерений ( $\approx 4\%$ ); 2) длина КС ( $l_{КС}$ ) начинает существенно влиять на величину измеряемых потерь при  $l_{КС} < 2l_p$  ( $l_p$  — шаг твиста КС); 3) влияние условий теплоотвода (в первом случае с КС снята лаковая изоляция, во втором он обмазан эпоксидной смолой и покрыт тремя слоями лавсановой ленты) становится заметным в нашем случае при скоростях изменения поля, больших  $1,5$  Тл/с (аналогичные условия теплоотвода при больших скоростях ( $\dot{B} \approx 5$  Тл/с) были исследованы группой авторов ранее<sup>[\*]</sup>).

В рамках программ создания сверхпроводящего инжектора "СПИНа" в Дубне и ускорительно-накопительного комплекса ИФВЗ в Протвино были выполнены исследования тепловыделений в различного типа токонесущих элементах обмоток импульсных сверхпроводящих диполей. Измерения проводились на коротких образцах без транспортного тока в переменном магнитном поле при  $T = 4,2$  К. Было использовано шесть типов образцов, среди которых выделим три следующих<sup>[2]</sup>.

1) Пучок изолированных КС (жилы из сплава НТ-50 в медной матрице<sup>[2/]</sup>, отличающихся диаметрами, количеством и толщиной сверхпроводящих ж)

Андрианов В.В. и др. ДАН СССР, 1978, т.241, № 5, с. 1064-1067.

жил, шагом твиста. Измерения потерь на образцах этого типа явились исходными для всех остальных образцов, так как в этом случае полностью исключены потери, вызванные токами, наведенными между проводами в кабеле.

- 2) Плоские скрутки резерфордского типа, изготовленные из различных КС и отличающихся сечением, числом проводников, способом их крепления, составом припоя, шагом транспозиции. Измерения проводились при различных ориентациях магнитного поля относительно широкой стороны скрутки.
- 3) Трубочатые образцы, предназначенные для изготовления магнитов с принудительной циркуляцией жидкого гелия<sup>\*)</sup>. В этом случае облуженный КС был навит одним слоем на мельхиоровую трубку с пропайкой или без нее.

В этой главе представлены результаты исследований зависимостей энергетических потерь от амплитуды и скорости изменения магнитного поля с треугольной формой импульсов ( $V_M \leq 2$  Тл;  $\dot{B} \leq 6$  Тл/с). В общей сложности было изучено свыше 50 образцов. Результаты выполненных исследований позволили провести сравнительный анализ различных вариантов токонесущих элементов, используемых при конструировании сверхпроводящих импульсных магнитов. Целесообразно формирование кабеля без сильной пропайки припоем. В этом случае потери для всех ориентаций магнитного поля близки к соответствующим значениям для пучка изолированных проволок. Полученные данные были использованы при создании сверхпроводящих диполей, разрабатываемых для ускорителей заряженных частиц.

В третьей главе представлены описание разработанной методики и результаты измерений удельного поперечного сопротивления композитных сверхпроводников ( $\rho_1$ ), определяющего величину вихревых потерь в матрице. Существующие на сегодняшний день способы измерения  $\rho_1$  либо достаточно сложны, либо не дают высокой точности и однозначности результатов. Вместе с тем, знание этого параметра позволяет по известным формулам рассчитать вихревые потери в КС и в некоторых случаях избавляет исследователей от необходимости создания сложной аппаратуры для измерения потерь.

Разработанная нами методика основана на измерении  $\rho_1$  простым четырехконтактным способом. Образцы изготавливались следующим образом. Нарезанные и облуженные куски КС укладывались с помощью специального шаблона в стопку и пропайвались при разогреве и небольшом обжатии. Крайние проволоки стопки были более длинными и использовались в качестве токовых подводов. Потенциальные концы (медная проволока диамет-

\*) Агапов Н.Н. и др. ПТЭ, 1981, № 2, с. 196-199.

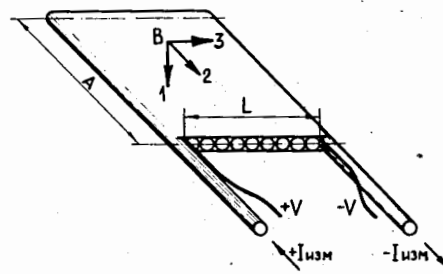


Рис. 2. Схематическое изображение образца для измерения удельного поперечного сопротивления композитного сверхпроводника.

тервале от 4,2 К до 20 К, в поле от нуля до 6 Тл.

В процессе измерений был обнаружен ряд особенностей, характерных для двух температурных диапазонов. При  $T > T_C$  для получения правильного значения  $\rho_1$  необходимо, чтобы ширина стопки (A) была меньше определяемой экспериментально длины захода тока в образец. При  $T < T_C$  сверхпроводящие жилы токоподводящих проводников являются эквипотенциальными вдоль своей длины и, следовательно, при любой ширине образца ток равномерно заходит в стопку. Однако при  $A$ , большем половины шага твиста КС -  $l_p/2$ , измерительный ток, проходя по стопке, частично протекает по сверхпроводящим жилам, и суммарное сопротивление образца оказывается заниженным. Если же  $A \ll l_p/2$ , жилы расположены практически перпендикулярно направлению тока и продольное перетекание по ним исключено. В этом случае сопротивление стопки определяется припоем и истинным поперечным сопротивлением КС. Приняв модель, предложенную Карром<sup>\*)</sup>, мы рассматриваем КС как континуум с анизотропными свойствами, усредненными по объему с большим числом сверхпроводящих жил. Проведя измерения удельного сопротивления припоя ( $Sn_{0,95}Ag_{0,05}$ ) при различных температурах и в различных магнитных полях, из общего сопротивления стопки рассчитываем удельное поперечное сопротивление КС.

Измерения были проведены на различных мелкодисперсных сверхпроводниках с жилами из сплава НТ-50 диаметрами от 6 до 20 мкм в медной матрице (коэффициент заполнения  $\lambda \approx 0,5$ ). Полученные нами значения

\*) Carr W.J., Jr., Journ. of Appl. Phys., 1974, v. 45, No.2, p. 929-938.

$\rho_{\perp}$  КС достаточно хорошо совпадают с данными других авторов<sup>\*)</sup>. Обращают на себя внимание очень высокие абсолютные значения  $\rho_{\perp}$  (от  $6 \cdot 10^{-10}$  до  $11 \cdot 10^{-10}$  Ом·м при продольном сопротивлении меди в КС  $\rho_{\parallel} = 1,25 \pm 3,04 \cdot 10^{-10}$  Ом·м), причем для данного коэффициента заполнения и диаметра жил они практически не зависят от сопротивления матрицы<sup>3,4/</sup>.

Измеренные поперечные магнитосопротивления КС ( $\Delta \rho_{\perp}(B) / \rho_{\perp}(B=0)$ ) при  $T = 4,2$  К существенно превосходят соответствующие значения для продольного направления тока ( $\Delta \rho_{\parallel}(B) / \rho_{\parallel}(B=0)$ ). Так, например, при  $B = 5$  Тл это превышение для различных образцов составляет величину от 2 до 4 раз ( $\Delta \rho_{\parallel}(5 \text{ Тл}) / \rho_{\parallel}(0) \approx 50\%$ ). При увеличении диаметра сверхпроводящих жил зависимость  $\rho_{\perp}$  от магнитного поля снижается. При  $T > T_c$ , когда реализуется случай бесконечного барьера между Nb-Ti жилами и медной матрицей (остаточное удельное сопротивление HT-50 на три порядка выше удельного сопротивления меди), ток при измерениях  $\rho_{\perp}$  течет главным образом по меди, и, как следствие, зависимость  $\Delta \rho_{\perp}(B) / \rho_{\perp}(B=0)$  практически совпадает с зависимостью  $\Delta \rho_{\parallel}(B) / \rho_{\parallel}(B=0)$ .

Нами были изучены зависимости удельных сопротивлений исследуемых образцов от температуры. Для продольного направления тока ( $\rho_{\parallel}$ ) во всех образцах наблюдается типичный резкий переход HT-50 в районе 9,5 К. Характерной особенностью переходов  $\rho_{\perp}(T)$  является их большая протяженность ( $\sim 3$  К при плотности измерительного тока  $\sim 10^4$  А/м<sup>2</sup>), причем, чем больше измерительный ток, тем больше эта размытость. У образцов с малым диаметром сверхпроводящих жил ( $\leq 10$  мкм) при поперечном пропускании тока наблюдается сдвиг критической температуры в сторону более низких значений ( $\Delta T_c \leq 0,5$  К). Это смещение исчезает у образцов с 20 мкм жилами, хотя размытие перехода  $\rho_{\perp}(T)$  остается примерно прежним.<sup>5/</sup>

Во всех предыдущих работах по исследованию удельного поперечного сопротивления КС наиболее вероятной причиной высоких значений  $\rho_{\perp}$  считалось наличие диффузионного Cu-Ti слоя, возникающего на границах между NbTi сверхпроводящими жилами и медной матрицей. Вместе с тем, длина свободного пробега электронов в матрице при  $T \approx 10$  К по нашим оценкам составляет 3-5 мкм; характерные расстояния между сверхпроводящими 10 мкм жилами внутри кластеров  $\leq 2$  мкм, между кластерами КС  $\leq 15$  мкм. То есть, в наших образцах существенное влияние на величины и характер поведения удельных сопротивлений могут оказывать размерные эффекты. Проводя эксперименты с образцами различного типа, нам удалось доказать, что это действительно так.

\*) Turck B. et al. Cryogenics, 1977, v.17, No.4, p. 217-223.

Для проверки корректности методики измерения удельного поперечного сопротивления КС мы использовали полученные значения  $\rho_{\perp}$  для вычисления по модели Карра вихревых потерь, которые затем сравнивали с результатами измерений, проведенных на тех же образцах. Экспериментальные результаты для двух образцов представлены на рис. 3 в виде точек; сплошные линии получены путем расчета вихревых потерь с использованием измеренного удельного поперечного сопротивления КС.

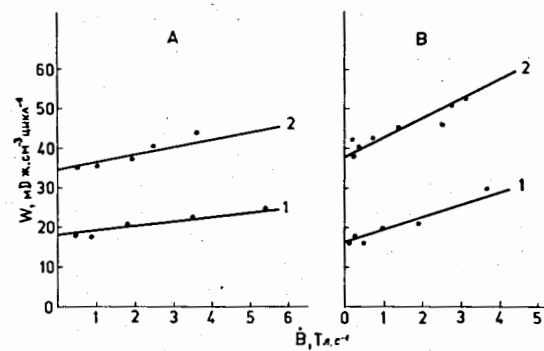


Рис. 3. Зависимость удельных энергетических потерь от скорости изменения магнитного поля с треугольной формой импульсов для двух образцов (А и В). 1 -  $V_M = 1,0$  Тл; 2 -  $V_M = 1,8$  Тл. Точки - экспериментальные результаты; сплошные линии - расчет.

Гистерезисные потери в обоих случаях определялись экстраполяцией экспериментальной зависимости  $W(B)$  к нулевому значению  $\dot{B}$ . Как видно из рисунка, получено вполне удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Это подтверждает корректность результатов измерения  $\rho_{\perp}$  с помощью описанной выше методики.

Четвертая глава посвящена исследованию энергетических потерь в КС в адиабатических условиях и изучению их влияния на переходные процессы в обмотках СМС при эвакуации энергии.

Как на это указывают результаты некоторых экспериментов, энергетические потери, выделяющиеся в "плотных" обмотках СМС при эвакуации энергии, могут оказывать существенное влияние на стабильность и характер переходных процессов. Выделение потерь в этом случае, как правило, происходит без существенного теплоотвода. Поэтому, ввиду почти полного отсутствия сведений о потерях в адиабатических условиях, изучение этого вопроса представляет практический интерес.

Для измерения энергетических потерь в КС без транспортного тока в адиабатических условиях нами разработана методика, основанная на экспериментальном определении максимальной температуры образца, помещенного в вакуумную камеру, и калировки полученных результатов с помощью нагревателя<sup>6/</sup>. В качестве исследуемых образцов было выбрано несколько характерных КС с жилами из сплава HT-50 в медной матрице, используемых, в основном, при создании небольших и средних сверхпрово-

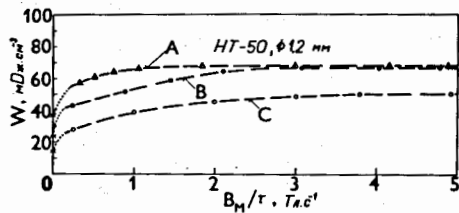


Рис. 4. Зависимость удельных энергетических потерь в адиабатических условиях от начальной скорости падения магнитного поля. А) -  $V_M/\gamma = 3$  Тл/с; В) -  $V_M = 1$  Тл; С) -  $V_M = 0,5$  Тл.

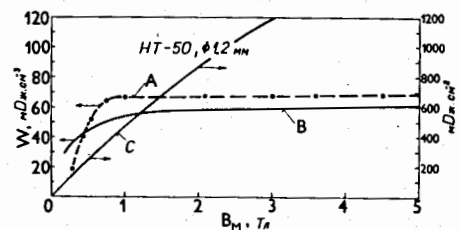


Рис. 5. Зависимость удельных энергетических потерь в адиабатических условиях от амплитуды магнитного поля. А) - эксперимент ( $V_M/\gamma = 3$  Тл/с), В) - расчет (адиабатические условия), С) - расчет (изотермические условия,  $T = 4,2$  К).

Полученное уравнение роста температуры КС при изменении внешнего магнитного поля не решается в явном виде, поэтому все расчеты проводились на ЭМ. Приведены математическое описание расчетов и общая схема программы, составленной на языке ФОРТРАН. Результаты вычисления энергетических потерь для одного из образцов представлены на рис. 5 сплошной линией. Из сравнения экспериментальных и расчетных значений видно, что получено вполне удовлетворительное их совпадение. Как показывают проведенные вычисления, насыщение зависимости  $w(V_M)$  обусловлено наличием обратной связи между выделяющимися потерями и ростом температуры КС.

Для проверки корректности предложенной методики расчета момента перехода в нормальное состояние КС с транспортным током проведены

для магнитов постоянного тока. Измерения потерь проводились при различных амплитудах и скоростях экспоненциально падающего магнитного поля ( $V = V_M \cdot e^{-t/\tau} / \gamma$ ). На рисунках 4 и 5 представлены характерные результаты, полученные для КС диаметром 1,2 мм, состоящего из 61 жилы  $\phi 110$  мкм с шагом твиста 25 мм. Насыщение зависимости  $w(V_M/\gamma)$  обусловлено достижением критической скорости изменения внешнего магнитного поля ( $\dot{V}_C^*$ ), при которой индуцированные токи полностью заполняют КС. Важно отметить, что при рассмотренных условиях изменения магнитного поля ( $V_M \leq 5$  Тл;  $V_M/\gamma \leq 5$  Тл/с) КС без транспортного тока не переходит в нормальное состояние [8,9].

Разработан приближенный метод расчета энергетических потерь в КС в адиабатических условиях при  $\dot{V} > \dot{V}_C^*$  и способ определения момента перехода КС в нормальное состояние. По-

эксперименты по изучению условий стабильности "плотного" сверхпроводящего секционированного лабораторного соленоида ( $V_{MC} \approx 8$  Тл) при эвакуации энергии [10]. В соленоид заводился транспортный ток, которому соответствует индукция магнитного поля в центре апертуры  $V_H$ . Затем ручным запуском системы защиты энергия, запасенная в соленоиде, эвакуировалась либо на омическое сопротивление, либо на дугогасительную решетку. Если в процессе эвакуации обмотка переходила в нормальное состояние, то снимаемая осциллограмма позволяла определять ток в соленоиде и, следовательно, поле в апертуре ( $V_H$ ) в момент перехода. Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 6 и 7.

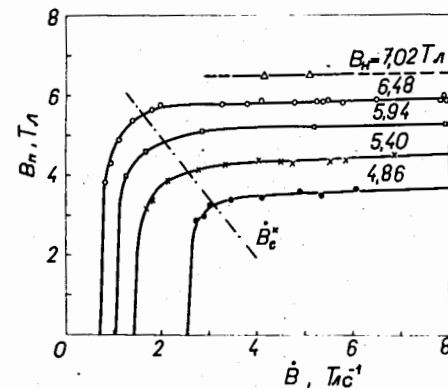


Рис. 6. Зависимость индукции магнитного поля перехода обмотки соленоида в нормальное состояние от скорости эвакуации энергии для различных начальных значений поля.

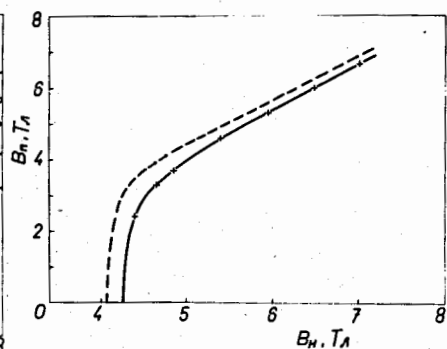


Рис. 7. Зависимость индукции магнитного поля перехода обмотки соленоида от начального значения поля перед эвакуацией. Сплошная кривая - эксперимент; пунктирная - расчет.

Как и следовало ожидать из результатов измерения потерь (см. рис. 4), при  $\dot{V} > \dot{V}_C^*$  поле перехода, обусловленного выделением энергетических потерь в обмотке, не зависит от скорости эвакуации. Из рис. 7, где пунктирной линией представлены результаты расчета зависимости  $V_H = f(V_H0)$  при  $\dot{V} > \dot{V}_C^*$ , видно, что получено вполне удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных. Таким образом, предложенный метод расчета, несмотря на ряд принятых допущений, может быть с успехом использован для количественных оценок влияния потерь на переходные процессы в "плотных" обмотках СМС.

Расчеты, проведенные на примере "плотного" соленоида ( $V_{MC} = 7,72$  Тл), показывают, что потери могут весьма эффективно переводить обмотку в нормальное состояние, предохраняя ее тем самым от возможного локального перегрева [11]. При этом эффективные скорости перехода

обмотки в нормальное состояние превышают характерные скорости одномерного распространения нормальной зоны в КС за счет тепловой диффузии на 2-3 порядка и составляют величину  $\sim 10$  км/с.

Построены номограммы перехода в нормальное состояние различных КС с транспортным током, падающим синхронно с внешним магнитным полем. Они позволяют производить оперативную оценку влияния энергетических потерь на стабильность и характер переходных процессов в "плотных" обмотках СМС при эвакуации энергии.

В заключении приводятся основные итоги диссертационной работы:

1) Экспериментально исследовано влияние некоторых факторов формирования образца на величину потерь, измеряемых электрическим методом, а именно: коэффициента заполнения образца композитным сверхпроводником, длины КС по сравнению с шагом твиста сверхпроводящих жил, влияние условий теплоотвода от образца при относительно малых скоростях изменения магнитного поля. На основании этого выработаны конкретные требования, соблюдение которых необходимо для получения корректных результатов.

2) Предложен простой способ измерения площади петли намагниченности сверхпроводников. Это значительно упрощает обработку экспериментальных результатов и в некоторых случаях позволяет проводить измерения энергетических потерь при существенно больших скоростях изменения магнитного поля.

3) Проведены измерения потерь в коротких образцах различного типа сверхпроводящих токнесущих элементов, помещенных в переменное магнитное поле. Исследовано более 50 образцов. Результаты этих измерений позволили провести сравнительный анализ различных вариантов обмоточных токнесущих элементов, используемых при создании сверхпроводящих импульсных магнитов. Целесообразно формирование кабеля без сильной пропайки припоем. В этом случае потери для всех ориентаций магнитного поля близки к соответствующим значениям для пучка изолированных проволок.

4) Разработана простая методика измерения удельного поперечного сопротивления КС. Знание этого параметра позволяет рассчитывать вихревые потери в проводниках. В некоторых случаях это может избавить исследователей от необходимости создания аппаратуры для измерения потерь и привести к значительной экономии жидкого гелия, так как измерения поперечного сопротивления можно проводить в транспортном дьюаре с минимальными затратами гелия.

5) Впервые исследованы терморезистивные и магниторезистивные

свойства удельного поперечного сопротивления КС. Обнаружены сильная зависимость  $\rho_{\perp}$  от магнитного поля и большая протяженность его переходов в сверхпроводящее состояние по температуре.

6) Разработана методика измерения потерь в коротких образцах без транспортного тока в адиабатических условиях. Проведены измерения потерь в некоторых характерных КС, используемых при создании небольших и средних СМС постоянного тока. Исследованы зависимости адиабатических потерь от амплитуды и скорости изменения магнитного поля.

7) Разработана приближенная методика расчета энергетических потерь в КС в адиабатических условиях при скоростях изменения магнитного поля выше критических скоростей насыщения КС индуцированными токами. Создана программа вычисления этих потерь на ЭВМ. Получено вполне удовлетворительное совпадение расчетов с результатами проведенных экспериментов.

8) Проведены эксперименты по исследованию условий стабильности обмотки "плотного" сверхпроводящего лабораторного соленоида при эвакуации энергии. Расчеты, проведенные по разработанной методике, вполне удовлетворительно совпадают с экспериментальными результатами.

9) Проведенные экспериментальные и расчетные исследования показывают, что в некоторых случаях при эвакуации энергии потери могут весьма эффективно переводить обмотку в нормальное состояние и тем самым предохранять ее от локального перегрева.

10) Построены расчетные номограммы перехода в нормальное состояние различных КС с транспортным током, находящихся в падающем магнитном поле. Они позволяют оперативным образом проводить оценки влияния энергетических потерь на стабильность и характер переходных процессов "плотных" обмоток СМС при эвакуации энергии.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Дробин В.М., Дьячков Е.И., Кремпаски Л., Лупшов В.Г., Малки В.А., Полак М., Талала Й., Хованец Ф., Хухарева И.С. К определению энергетических потерь в композитных сверхпроводниках. Сообщение ОИЯИ, Р8-82-55I, Дубна, 1982, 6 с.
2. Chovanec F., Drobin V.M., Dyachkov E.I., Jansak L., Khukhareva I.S., Kulikov Yu.V., Luppov V.G., Malyuk V.A., Smirnov A.A. Losses in superconducting cables in pulsed magnetic fields. Cryogenics, 1981, v.21, No.9, p. 559-562.
3. Drobin V.M., Dyachkov E.I., Khukhareva I.S., Luppov V.G., Nikitiu A. Direct measurement of the transverse resistivity of multifilamentary superconducting composites. Cryogenics, 1982, v.22, No.3, p. 115-119.



4. Дробин В.М., Дьячков Е.И., Луппов В.Г., Никитиу А., Херцог Р., Хованец Ф., Хухарева И.С. Электросопротивления различных компонент сверхпроводящих кабелей. Препринт ОИЯИ, Р8-80-594, Дубна, 1980, 5 с.
5. Луппов В.Г., Хухарева И.С. Полак М. Терморезистивные и магниторезистивные свойства s-n переходов в мелкодисперсных композитных сверхпроводниках. Тезисы докладов XII Всесоюзного совещания по физике низких температур, Кишинев, 1982, ч. III, с. 156-157.
6. Кабат Д., Луппов В.Г., Шишов Ю.А. Результаты экспериментального и теоретического исследования потерь в многожильных сверхпроводниках в адиабатических условиях. Депонированное сообщение ОИЯИ, Б1-8-81-558, Дубна, 1981, 25 с.
7. Kabat D., Luppov V.G., Shishov Yu.A. Energy losses of composite superconductors at a pulse of the transverse magnetic field under adiabatic conditions. IEEE Trans. on Magn., 1981, v. MAG-17, No.5, p. 2270-2273.
8. Kabat D., Luppov V.G., Shishov Yu.A. Influence of adiabatic conditions on the losses in composite superconductors. Cryogenics, 1982, v. 22, No.2, p. 69-72.
9. Кабат Д., Луппов В.Г., Шишов Ю.А. Основные отличия выделения энергетических потерь в композитных сверхпроводниках при адиабатических и изотермических условиях. Сборник аннотаций докл. XX конф. стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур, Вроцлав, ПНР, 1981, с. 63.
10. Luppov V.G., Kabat D., Shishov Yu.A., Datskov V.I. Influence of losses on the stability of a high current density superconducting magnet winding during the energy removal process. Cryogenics, 1980, v.20, No.10, p. 571-574.
- II. Кабат Д., Луппов В.Г. Стабильность и скорость перехода в нормальное состояние обмоток сверхпроводящих магнитов вследствие энергетических потерь при эвакуации энергии. Препринт ОИЯИ, Р8-82-218, Дубна, 1982, 14 с.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 сентября 1983 года