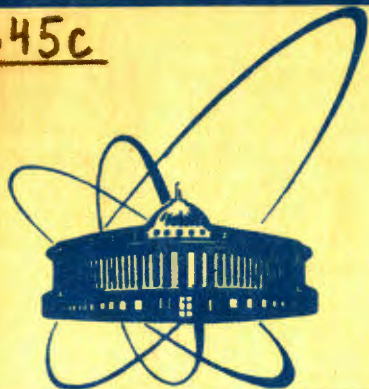


83-777

С 345с



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

944/84

P9-83-777

П.Г.Василев, Б.А.Вахненко\*, В.И.Деев\*,  
Л.Н.Зайцев\*, Г.П.Решетников, В.С.Харитонов\*

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ДИПОЛЯ  
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ОБМОТКИ.  
ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ

---

\* Московский инженерно-физический институт

1983

Изучение условий образования и развития нормальной зоны /НЗ/ имеет важное практическое значение, в частности для обеспечения сохранности сверхпроводящих /СП/ обмоток магнитов с большой запасенной энергией.

При локальном импульсном нагреве выше критической температуры в обмотке СП магнита с изменяющимся во времени транспортным током  $I(t)$  инициируется НЗ длиной  $l(t)$ . При этом на витках появляется напряжение  $U(t) = \rho l I / S$  и возникает джоулево тепловыделение мощностью  $W(t) = \rho l / S \cdot I^2 / \rho$  - удельное сопротивление,  $S$  - поперечное сечение кабеля/.

Процесс распространения НЗ в одномерном приближении описывается уравнением теплопроводности:

$$\gamma c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{W}{Sl} - \frac{\Pi}{S} q, \quad /1/$$

где  $\gamma$ ,  $c$ ,  $\lambda$  и  $\Pi$  - плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и периметр теплового взаимодействия кабеля,  $q$  - плотность теплового потока на единицу поверхности.

Изменение во времени размеров НЗ будет зависеть от соотношения между омическим нагревом и теплом, отводимым от НЗ. Анализ опубликованных данных <sup>/1,2/</sup> показал, что скорость распространения НЗ в обмотке магнита в значительной степени определяется присутствием ограниченного количества жидкого гелия в объеме кабеля. Так, при изменении объема, занимаемого жидким гелием в кабеле дипольного магнита ускорителя "Изабелла", от 0 до 5% скорость распространения НЗ уменьшалась в 4 ÷ 6 раз <sup>/1/</sup>. В <sup>/2/</sup> отмечается, что особенности процесса распространения НЗ в обмотке магнита типа "оконная рама" связаны с наличием в ней гелия.

Соотношение <sup>/1/</sup> является основой известных расчетных моделей для определения скорости распространения НЗ, в которых значительную трудность представляет описание теплоотдачи в гелий. Использование известных формул, описывающих стационарную теплоотдачу, как правило, приводит к сильному рассогласованию результатов расчетов с экспериментальными данными. Это связано с тем, что нестационарная теплоотдача при достаточно малых отрезках времени с момента начала процесса может превышать стационарную теплоотдачу в несколько раз и уменьшать тем самым скорость распространения НЗ. Поэтому достоверный расчет скорости распространения НЗ в обмотке магнита невозможен без корректного описания нестационарной теплоотдачи, а также процессов испарения гелия и перегрева его пара.

В настоящей работе рассматриваются результаты исследования поведения НЗ в обмотке СП диполя типа "оконная рама" <sup>/5,6/</sup> при локальном импульсном нагреве кабеля.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Нормальная зона в обмотке магнита возникала в результате локального импульсного нагрева длительностью  $\sim 0,5$  мс, который



создавался с помощью электрических нагревателей <sup>3/3</sup>, изготовленных из константановой проволоки. Нагреватель Н4 длиной 0,48 м /протяженный нагреватель/ помещался между витками обмотки. Второй нагреватель размерами 3x6 мм<sup>2</sup> /короткий нагреватель/ приклеивался к обмотке со стороны апертуры. Нагреватели были теплоизолированы от гелия.

Виток кабеля, расположенный непосредственно под нагревателем, обозначим через П1, а два витка, примыкающие к короткому нагревателю, - через П5 и П6. В измерениях с протяженным нагревателем температура обмотки контролировалась с помощью угольных термометров ТВ0 и АБ4, приклеенных к витку П1. Температура витков П5 и П6 контролировалась термометром АБ1, расположенным за нагревателем Н1 <sup>3/3</sup>. К концам витков П1, П5 и П6 припаяны пары потенциальных выводов.

Записи изменения температуры  $\Delta T(t)$  и возникающего на каждом из витков напряжения  $U(t)$  синхронизированы. Эксперименты проводились при постоянном транспортном токе в магните  $I$  /критический ток магнита равен 2000 А/ и различных величинах теплового импульса  $Q$ . Между последовательными импульсами тепловыделения выдерживались паузы, достаточные для полного остывания обмотки.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены результаты экспериментов, проведенных с коротким нагревателем. Показаны /см. рис.1а/ кривые изменения во времени температуры ( $\Delta T(t) = T(t) - 4,2$ ) термометра АБ1 для различных значений энергии, выделенной в нагревателе,  $Q$ . Характер изменения этих кривых во времени при  $Q \geq 2,09$  Дж /наличие изгиба и горизонтального участка после прохождения максимума/ указывает на возникновение НЗ. На рис.1б показаны зависимости напряжения на витках П5 и П6 от времени при  $Q = 2,25$  Дж и  $I = 150$  А. Исходя из этой зависимости можно оценить значение скорости распространения НЗ:  $V_3 \approx L_{\text{ВИТ}} / U_H \cdot dU/dt = 0,4$  м/с / $L_{\text{ВИТ}}$  - длина витка,  $U_H$  - напряжение на витке в нормальном состоянии/. Расчет скорости распространения НЗ в обмотке магнита по соотношению

$$V_p = \frac{I}{S_{\text{yc}}} \sqrt{\frac{\rho \lambda}{T_c(B) - 4,2}} \quad /2/$$

полученному в адиабатическом приближении <sup>4/4</sup>, дает значение  $V_p = 0,8$  м/с. Это уменьшение скорости, по-видимому, связано с оттоком тепла от фронта распространяющейся НЗ в гелий, который находится в зазорах между проводниками в кабеле. Время запаздывания развития НЗ в витке П5  $< 0,5$  с/ характерно для процесса распространения тепла от витка к витку.

Иной характер развития НЗ наблюдается в измерениях с протяженным нагревателем /рис.2/. Первоначально возникшая НЗ стабилизируется в течение одной секунды / $V_3 = 0$ /, после чего начинает

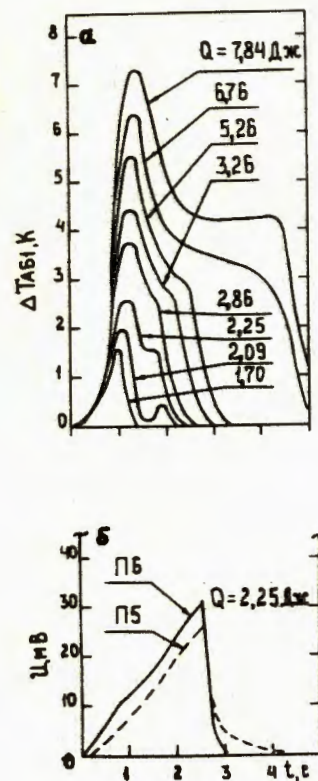


Рис.1. Зависимости от времени: а/ температуры  $\Delta T$  термометра АБ1 при различных значениях энергии, выделенной в нагревателе,  $Q$ ; б/ напряжения на витках П5 и П6 при  $Q = 2,25$  Дж. Короткий нагреватель,  $I = 150$  А.

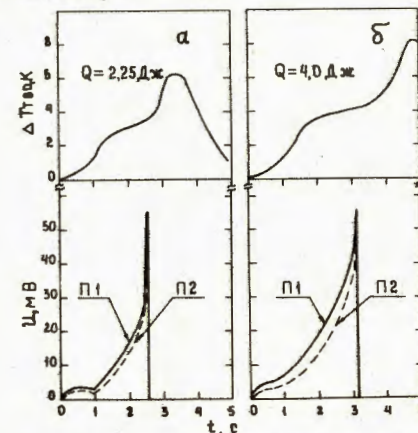


Рис.2. Зависимость температуры термометра ТВ0 и напряжения на витках П1 и П2 от времени при а/  $Q = 2,25$  Дж, б/  $Q = 4$  Дж, протяженный нагреватель,  $I = 200$  А.

распространяться /рис.2а/. При этом значение скорости  $V_3$  распространения НЗ изменяется от нуля до 0,7 м/с. Значение скорости НЗ, рассчитанное по выражению /2/, составляет  $V_p = 1,1$  м/с. С увеличением  $Q$  время существования стационарной НЗ уменьшается /рис.2б/. Причина образования стационарной НЗ при нагреве обмотки нагревателем Н4 могла заключаться в следующем. В случае сосредоточенного источника нагрева /Н1/ выделившегося количества энергии  $Q \geq 2,09$  Дж было достаточно не только для перевода в нормальное состояние части кабеля под нагревателем, но и для выкипания в объеме этого участка гелия. Напротив, после выделения энергии  $Q = 2,25$  Дж на длине 0,48 м, по-видимому, происходил переход в нормальное состояние участков кабеля под нагревателем суммарной длиной 8,6 см. Джоулево тепловыделение за одну секунду существования стационарной НЗ соответствует энергии, необходимой для испарения гелия, находящегося в кабеле длиной ~1 м. Отметим, что за одну секунду тепло распространяется вдоль кабеля в обе стороны от нагретого участка на расстояние  $\delta = \sqrt{at} = 0,2$  м/а - коэффициент температуропроводности кабеля/. Вместе с отрезком кабеля, расположенным под нагревателем, это также



составляет величину около одного метра. На процесс испарения гелия в объеме кабеля как причину существования стационарной НЗ указывает и наличие близкого к горизонтальному участка на зависимости  $\Delta T(t)$  термометра ТВ0 /рис.2/.

Рис.3 демонстрирует эффект накопления тепла в обмотке, когда временная пауза между последовательными тепловыми импульсами была уменьшена до  $1 \div 2$  мин. Видно, что при часто повторяющихся импульсах энергия, необходимая для образования НЗ, может существенно уменьшаться. Рост напряжения на витке после его перехода в нормальное состояние  $/U > 55$  мВ/ связан с увеличением размеров НЗ и возрастанием удельного сопротивления кабеля в процессе джоулева разогрева.

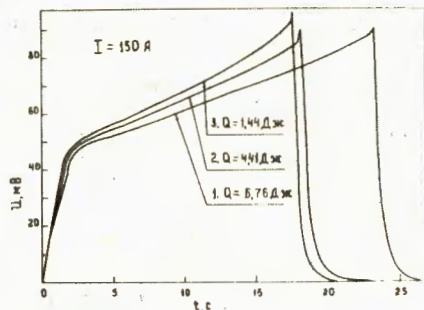


Рис.3. Временные зависимости напряжения на витке П1 для серии последовательных тепловых импульсов,  $I = 150$  А. Цифры  $1 \div 3$  указывают на порядок следования импульсов.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведено измерение скорости распространения нормальной зоны, возникшей в результате локального импульсного нагрева обмотки дипольного магнита типа "оконная рама".
2. Сделана попытка объяснить особенности поведения нормальной зоны во времени присутствием ограниченного количества жидкого гелия в зазорах между проводами кабеля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sampson W.B., Garber M., Grosh A. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1981, vol. 28, No 3, p. 3245-3247.
2. Allinger J. et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1981, vol. 28, No 3, p. 3234-3236.
3. Василев П.Г. и др. ОИЯИ, Р9-83-394, Дубна, 1983.
4. Altov V.A. et al. Cryogenics, 1983, vol. 13, No 7, p. 420-422.
5. Жидков Е.П., Полякова Р.В., Шелаев И.А. ОИЯИ, Р11-12324, Дубна, 1979.
6. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-80-333, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 ноября 1983 года.

Василев П.Г. и др.

P9-83-777

Тепловые процессы и устойчивость сверхпроводящего диполя при импульсном нагреве обмотки. Особенности распространения нормальной зоны

Исследовались закономерности распространения нормальной зоны в сверхпроводящем кабеле дипольного магнита типа "оконная рама" при локальном импульсном нагреве обмотки с помощью электрических нагревателей. Синхронно регистрировались напряжение на потенциальных парах и температура обмотки, что позволило объяснить фазы роста нормальной зоны их зависимостью от различных режимов теплоотдачи в гелий. Приведены измерения скорости распространения нормальной зоны. Особенности поведения нормальной зоны в обмотке сверхпроводящего диполя определяются присутствием ограниченного количества жидкого гелия в зазорах между проводами кабеля.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Vasilev P.G. et al.

P9-83-777

Heat Processes and Stability of a Superconducting Dipole at Pulsed Heating of Winding. Special Properties of Propagation of the Normal Zone

Regularities of propagation of a normal zone in a superconducting cable of a "window frame" type dipole magnet have been studied under local pulsed heat supply to a winding by means of electric heaters. The voltage on potential pairs and the temperature of the winding are synchronously traced. This allows the growth phase of the normal zone to be interpreted as a consequence of different modes of heat supply to helium. The speeds of propagation of the normal zone have been measured. Special properties of the behaviour of the normal zone in the winding of the superconducting dipole are determined by a limited amount of liquid helium in the gaps between the cable wires.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой