

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P8-86-583**

**В.М.Микляев, В.Ф.Минашкин, С.Ю.Селюнин,  
И.А.Сергеев, А.В.Скрыпник, Ю.П.Филиппов**

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ  
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ  
ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ  
В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО  
ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ**

Направлено на XIII Международную конференцию  
по ускорителям частиц высоких энергий  
(7-11 августа 1986, Новосибирск)

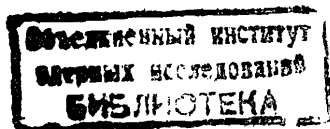
**1986**

Прокачные или погружные сверхпроводящие магниты служат основными элементами таких электрофизических установок, как ускорители заряженных частиц, термоядерные реакторы с магнитным удержанием плазмы и т.п. Характеристики этих магнитов, а также надежность работы систем в целом существенно зависят от условий криостабилизации сверхпроводящих обмоток на гелиевом температурном уровне. Эти условия в значительной мере определяются характеристиками теплопередачи при стационарных и импульсных энерговыделениях. Последние могут быть обусловлены, в частности, деформациями и взаимными перемещениями витков обмоток под действием пондеромоторных сил, скачками магнитного потока, внезапным растрескиванием изоляции, радиационным разогревом и т.п.

Следует отметить, что объем данных по импульсной теплопередаче к гелию относительно мал, практически не систематизирован и охватывает не все режимы и условия, интересующие разработчиков сверхпроводящих магнитных систем. В связи с этим интерес к подобным исследованиям возрастает.

Цель настоящей работы состоит в восполнении некоторых пробелов в объеме данных по импульсной теплопередаче к гелию применительно к условиям работы сверхпроводящих магнитов погружного типа, таких, как описанные, например, в [1].

Эскиз части поперечного сечения такого магнита показан на рис. 1, где также представлен экспериментальный образец, с помощью которого моделировались исследуемые тепловые режимы. Образец состоит из подложки 7, представляющей собой шлифованную керамическую трубку  $\phi 11,5 \times 1,75$  мм, и напыленной на ее поверхность углеродной пленки 8 длиной 54 мм. Углеродная пленка служит одновременно нагревателем и малоинерционным высокочувствительным термопреобразователем. Толщина нагревателя - термометра НТ менее 1 мкм, время тепловой реакции менее 100 нс, чувствительность  $1/R \cdot dR/dT$  около  $0,2 \text{ K}^{-1}$  при температуре 4 К. Постоянная времени выравнивания поля температур по толщине подложки  $\sim 0,5$  мс. С торцов керамическая трубка закрыта текстолитовыми заглушками 6, вклеенными с помощью эпоксидного клея, что позволяет при гелиевых температурах поддерживать внутри трубки вакуум. На рис. 1 показана также трубка 9 из стали 12Х18Н10Т  $\phi 16 \times 1$  мм длиной 80 мм. В эту трубку при необходимости можно помещать образец, моделируя "стесненные условия" в сверхпроводящем магните погружного типа. Образец устанавливался в держатель 2, позволяющий фиксировать его в горизонтальном, вертикальном и промежуточных положениях в объеме гелия.



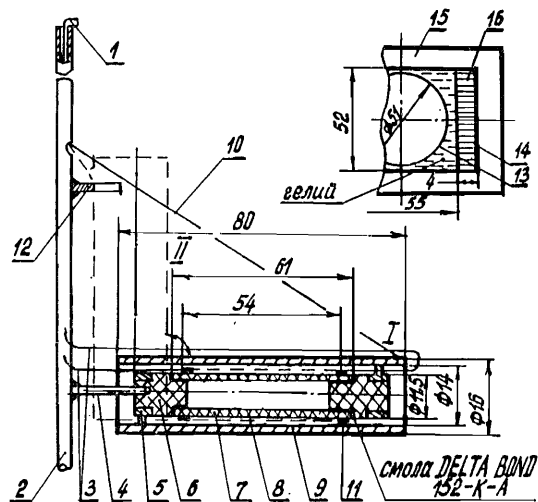


Рис.1. Конструкция экспериментального образца:

1 - фиксатор, 2 - держатель, 3 - провода, 4 - опора, 5 - центрирующая вставка, 6 - заглушка, 7 - керамическая подложка, 8 - углеродная пленка, 9 - трубка из стали, 10 - гибкая тяга, 11 - кольцевые серебряные контакты, 12 - ограничитель, 13, 14, 15 и 16 - соответственно ионопровод, электроизоляция, железо и сверхпроводящая обмотка погружного магнита СПИИ /1/.

НТ был прокалыван в гелии - (1,6+5,03) К; водороде - (13,6+20,18) К; азоте - (77+85) К, а также при комнатной температуре (293 К). По данным калибровки построен градуировочный полином вида  $\ln T = \sum_{k=1}^n a_k (\ln R^{-1})^k$  со среднеквадратичным отклонением 0,1%. Структура аппаратуры для исследования импульсной теплопередачи представлена на рис.2.

Мощность на образец подается от усилителя мощности УМ через блок нагрузок и защиты БНЗ. Особенность УМ состоит в том, что он может работать в режиме стабилизации как напряжения, так и мощности. Последний режим необходим в связи с тем, что величина нагрузки за время импульса может изменяться более чем в 3 раза. Схемная реализация этого варианта приведена в /2/. УМ обеспечивает длительность переднего фронта импульса около 10 мкс при изменении напряжения от нуля до

200 В. Длительность, амплитуда, скважность и величина переднего фронта импульсов мощности задаются блоком управления и согласования БУС, который, кроме того, формирует импульсы запуска для АЦП. Более подробно функции БУС описаны в /2/.

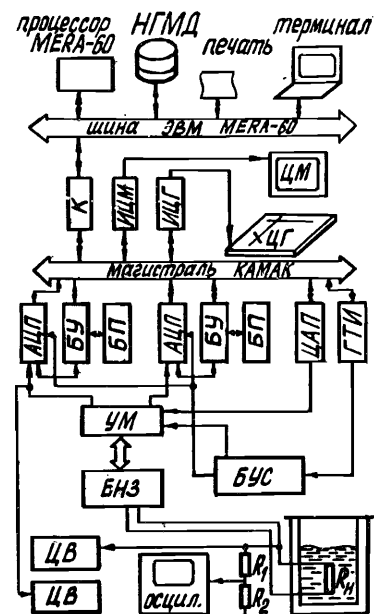


Рис.2. Блок-схема измерительной системы: НГМД - накопитель на гибких магнитных дисках, К - контроллер крейта, ИЦП - интерфейс соответственно цветных монитора и графопостроителя, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, БП - буферная память, БУ - блок управления буферной памятью, ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь, ГТИ - генератор тактовых импульсов, УМ - усилитель мощности, БНЗ - блок нагрузок и защиты, БУС - блок управления и синхронизации, ЦВ - цифровой вольтметр.

Величина мощности, выделяемой в нагрузку, задается с помощью 10-разрядного цифро-аналогового преобразователя ЦАП. Оцифровка измеряемых токов и напряжений осуществляется 12-разрядными аналого-цифровыми преобразователями АЦП САМ 4.04-1 /9/. Данные с обоих АЦП записываются в буферную память БП объемом 4 К x 16 через блок управления последовательной записью БУ. После заполнения БП данные считываются в ЭВМ через магистраль КАМАК. Параметры импульса мощности, подаваемого на нагрузку, контролируются запоминающим осциллографом Tektronix-7623. В качестве поверочных приборов при калибровке используются нановольтметры Keithley-181.

Связь ЭВМ МЕРА-60 с магистралью КАМАК осуществляется через стандартный контроллер IO6A /9/. Для вывода полученной информации на монитор и графопостроитель используются интерфейсные блоки ИЦМ и ИЦГ.

Пакет программ, обеспечивающих проведение экспериментов на линии с ЭВМ и последующую их обработку, написан на языках MACRO-II и Фортран-IV.

Во всем диапазоне измерений погрешности определяемых величин - разностей температур, мощностей тепловыделения и интервалов вре-

мени — не превышали соответственно 0,5%, 1+4% и 1,0 мкс.

При расчетах характеристик тепловых режимов использованы данные по теплопроводности и теплоемкости материала подложки — керамики, полученные в Техническом университете Дрездена и в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ <sup>/4/</sup>.

Конкретными теплофизическими свойствами использованной аморфной углеродной пленки мы не располагаем. Поэтому определение температуры теплоотдающей поверхности  $T_{пов}$  из среднеинтегральной по толщине НТ температуры  $T_{ср}$ , определяемой в эксперименте, не производилось. В связи с этим везде под перегревом  $\Delta T$  надо понимать разность температур  $T_{ср}$  и объема гелия  $T_S$ :  $\Delta T = T_{ср} - T_S$ . Следует отметить, что, как показали оценки, величины  $T_{ср}$  и  $T_{пов}$  отличаются не более чем на 5+10%. Для оценочных расчетов использованы свойства аморфных углеродных нитей, приведенные в работе Гарднера и Андерсона <sup>/5/</sup>.

Эксперименты проведены в объеме насыщенного гелия при давлениях 60, 100, 140 и 180 кПа при горизонтальной и вертикальной ориентациях образца в свободных и стесненных условиях.

Полученные результаты представлены в виде зависимостей перегрева  $\Delta T$  НТ от времени  $t$  после наброса импульса мощности ступенчатой формы. Параметром служит мощность тепловыделения. Каждая кривая состоит из ~ 8000 точек, из которых ~ 4000 получены с интервалом 50 мкс, а остальные — с интервалом 15 мс при той же мощности. Первое измерение производилось через 10 мкс после наброса импульса мощности.

Результаты экспериментов при вертикальной ориентации образца в свободных условиях в сравнении с данными Стюарта <sup>/3/</sup> представлены на рис.3. Экспериментальный образец Стюарта представлял собой плоскую пластинку, состоящую из кварцевой подложки и напыленной на ее поверхность тонкой углеродной пленки, служащей нагревателем-термометром. Разогрев НТ осуществлялся ступенчатыми импульсами электрического тока при стабилизированном напряжении на НТ.

На рисунке отчетливо прослеживаются выделенные Стюартом области нестационарной теплопроводности, стационарного пузырькового кипения, метастабильной нуклеации, переходного и стационарного пленочного кипения, участки нестационарного закипания и кризиса. В этих областях наблюдается хорошее качественное согласование полученных результатов с данными Стюарта.

Однако на рисунке присутствует область, в которой зарегистрированы не отмеченные Стюартом процессы. Эта область представляет собой неправильный треугольник и находится в интервалах перегревов от 1 до 10 К и времен от 100 мс до 60 с. Она образована кривыми зависи-

моостей перегрева НТ от времени, которые соответствуют мощностям импульса, близким к стационарной критической величине. Далее эта область именуется "областью неустойчивости" ОН.

Количественное расхождение экспериментальных результатов с данными Стюарта вне ОН можно объяснить различиями в геометриях, размерах и свойствах материалов экспериментальных образцов, а также тем, что размеры теплоотдающей поверхности образца Стюарта (5 x 10 мм) не обеспечивали автономности процесса теплопередачи <sup>/6/</sup>.

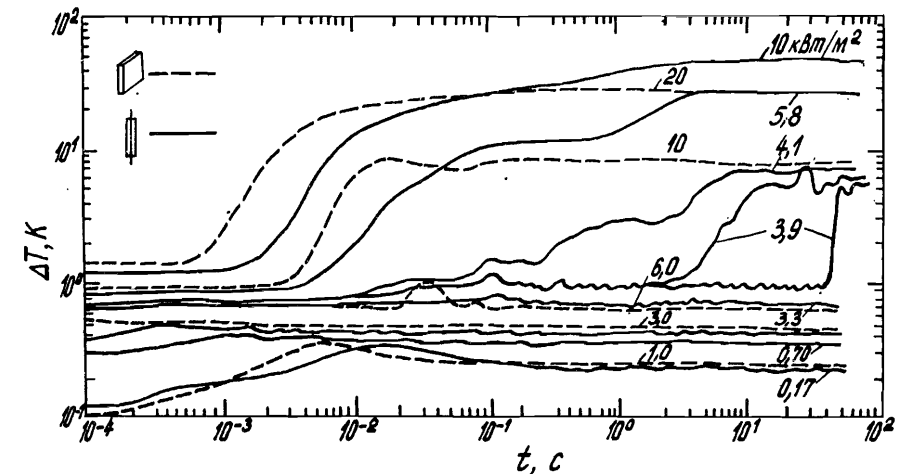


Рис.3. Зависимость перегрева  $\Delta T$  от времени  $t$  после наброса импульса мощности при вертикальной ориентации образца в свободных условиях в сравнении с данными Стюарта <sup>/3/</sup>. Давление  $P$  — атмосферное, параметр — плотность теплового потока (Вт/м<sup>2</sup>).

Кроме того, после наброса нагрузки на НТ с изменением температуры меняется его сопротивление, что при условии стабилизации напряжения на НТ приводит к изменению мощности тепловыделения. Так, например, при изменении температуры НТ на 1 и 10 К изменение мощности тепловыделения в гелий достигает соответственно величин 10 и 100%, что не может не влиять на ход процессов нестационарной теплопередачи, которые регистрировал Стюарт. В силу изложенного мощность тепловыделения,

как и плотность теплового потока в гелий от НТ, в экспериментах Стюарта не может считаться параметром, хотя в его работе именно плотность теплового потока использована как параметр. В отличие от приведенных данных Стюарта представленные нами результаты получены в экспериментах при стабилизированной во времени мощности  $W$  тепловыделения в НТ, которая обоснованно используется в качестве параметра. На рис.3 плотность теплового потока используется в качестве параметра лишь потому, что именно эту величину указывал на графиках в своей работе Стюарт.

Изложенными выше причинами, по-видимому, объясняется не только количественное расхождение настоящих результатов с данными Стюарта вне ОН, а также и отсутствие в его данных области неустойчивости и наблюдаемых в ней эффектов.

Изменение положения границ ОН и вида протекающих в ней процессов в зависимости от ориентации и наличия стесненных условий прослеживается по приведенным на рис.4+6 графикам в логарифмических координатах.

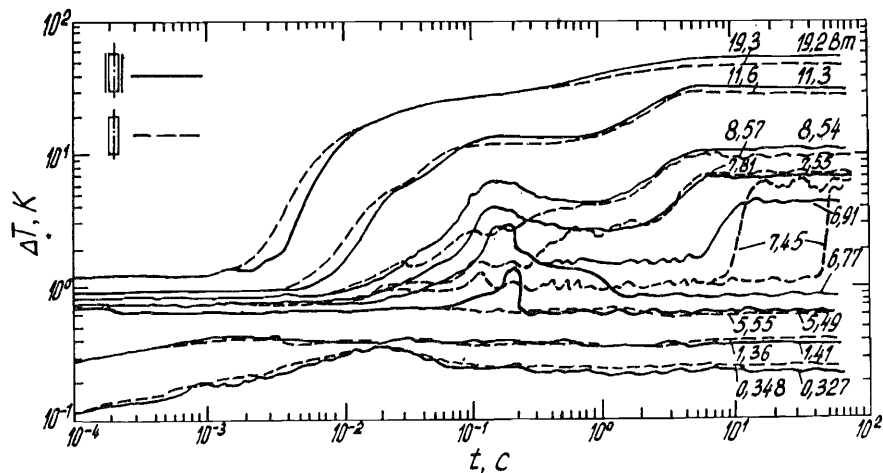


Рис.4. Зависимость перегрева  $\Delta T$  от времени  $t$  при различных значениях мощности тепловыделения  $W$  (Вт) в нагревателе-термометре  $\Delta T(t)_W$ . Вертикальная ориентация образца в свободных и стесненных условиях,  $P = 0,1$  МПа.

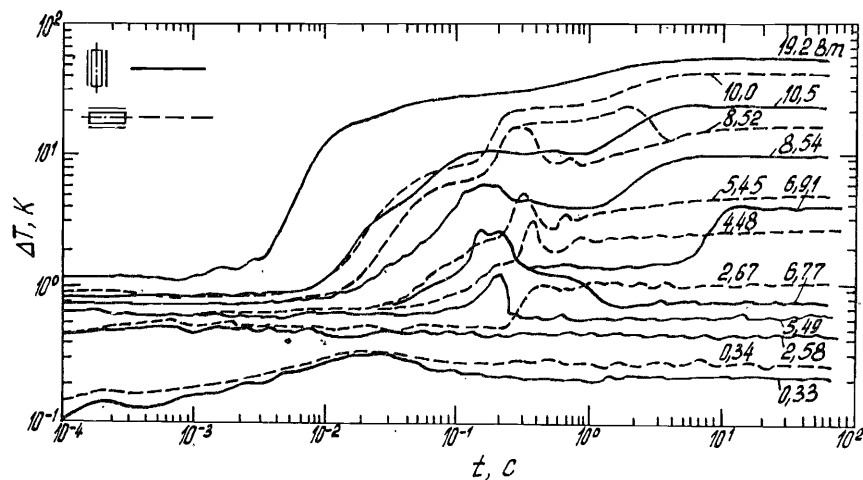


Рис.5. Зависимость  $\Delta T(t)_W$  при вертикальной и горизонтальной ориентациях образца в стесненных условиях,  $P = 0,1$  МПа.

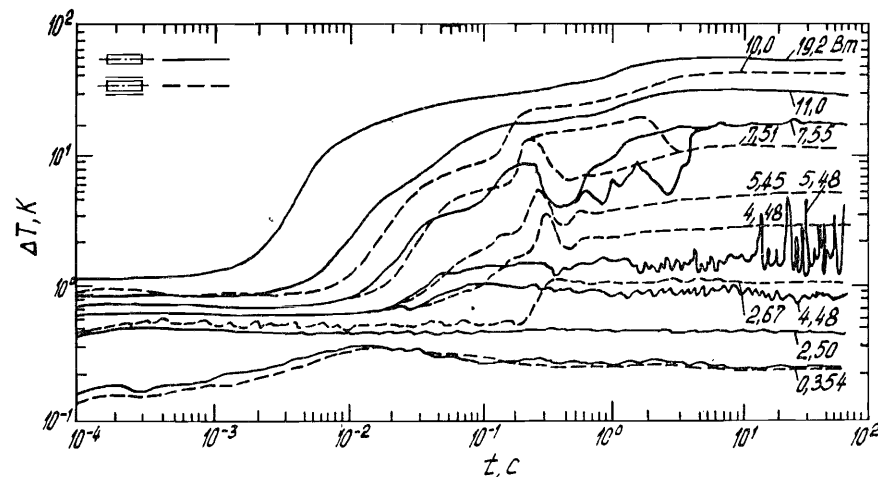


Рис.6. Зависимость  $\Delta T(t)_W$  при горизонтальной ориентации образца в свободных и стесненных условиях,  $P = 0,1$  МПа.

Положение границ ОН при вертикальной ориентации образца в свободных условиях указано выше. Помещение образца в стесненные условия вызывает смещение ОН в диапазоны перегревов  $0,1+1$  К, времен  $20$  мс +  $2$  с. Смена ориентации в стесненных условиях с вертикальной на горизонтальную приводит к установлению следующих диапазонов ОН: перегревов  $3+40$  К, времен  $100$  мс +  $60$  с. При горизонтальной ориентации образца в свободных условиях ОН находится в диапазонах перегревов  $1+20$  К, времен  $0,1+64$  с.

В области неустойчивости обнаружены следующие эффекты:

- возникновение ярко выраженных пиков перегрева (рис.4);
- развитие незатухающих колебаний температуры (рис.6);
- возможность хода процесса по нескольким путям при неизменной предпосылки - ветвление кривых (рис.4+6).

Более детально эти эффекты и их особенности в зависимости от ориентации и условий прослеживаются по графикам с равномерной шкалой, которые приведены на рис.7+9 (участки пиков температуры) и рис.10 (участок колебаний температуры).

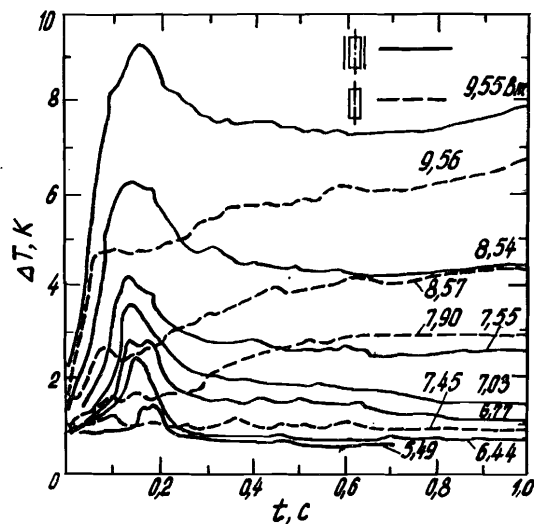


Рис.7. Зависимость  $\Delta T(t)_w$  при вертикальной ориентации образца в свободных и стесненных условиях. Участок пиков,  $P = 0,1$  МПа.

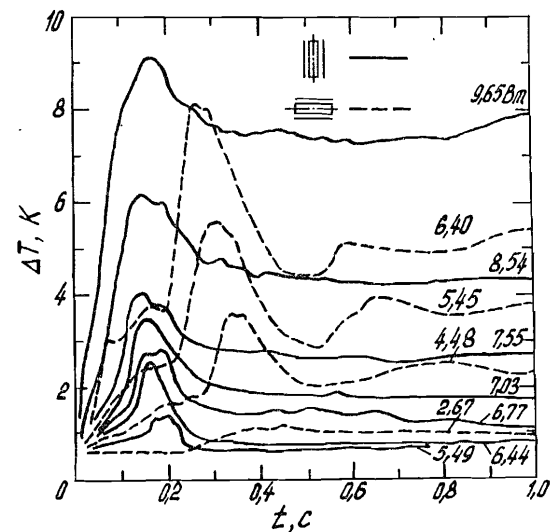


Рис.8. Зависимость  $\Delta T(t)_w$  при вертикальной и горизонтальной ориентации образца в стесненных условиях. Участок пиков,  $P = 0,1$  МПа.

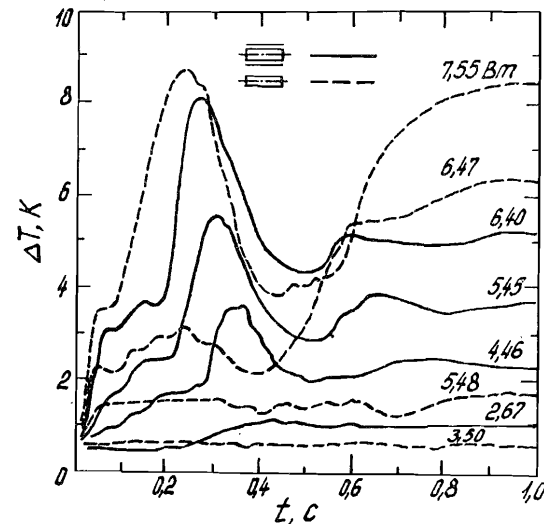


Рис.9. Зависимость  $\Delta T(t)_w$  при горизонтальной ориентации образца в свободных и стесненных условиях. Участок пиков,  $P = 0,1$  МПа.

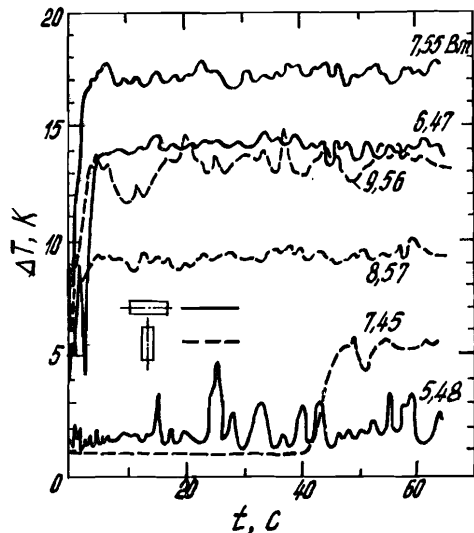


Рис. 10. Зависимость  $\Delta T(t)_w$  при вертикальной и горизонтальной ориентации образца в свободных условиях. Участок колебаний,  $P = 0,1$  МПа.

Анализ участков пиков показывает, что при вертикальной ориентации в стесненных условиях и горизонтальной в свободных (рис. 7, 9) момент времени наступления максимума перегрева слабо зависит от мощности нагрузки, однако при горизонтальной ориентации в стесненных условиях (рис. 8) эта зависимость становится заметной. У всех зарегистрированных пиков температуры обнаруживается связь амплитуды пика с мощностью нагрузки, тогда как связи ширины пика с нагрузкой при горизонтальной ориентации в свободных условиях (рис. 9) не прослеживается.

При вертикальной ориентации в свободных условиях ярко выраженных пиков не наблюдается (рис. 7), но отчетливо прослеживается часть переднего фронта таких пиков.

Отметим, что пики температуры свойственны режимам при нагрузках как больших, так и меньших стационарной критической величины. Последнее справедливо и для колебаний температуры (рис. 10), развивающихся через 5+10 с после наброса мощности. При этом амплитуда колебаний достигает величин 1+4 К.

При изменении давления происходит смещение области неустойчивости по мощностям в соответствии с зависимостью стационарной критической нагрузки от давления в объеме гелия. При повышении давления отно-

сительно величины 100 кПа интенсивность одних эффектов – пиков – ослабляется, других – колебаний перегрева – усиливается. При давлении 180 кПа пики температуры при всех условиях, кроме горизонтальной ориентации в стесненных условиях, полностью исчезают. С уменьшением давления ниже атмосферного наблюдается обратная тенденция, а при давлении 60 кПа колебания перегрева не возникают.

На эффект ветвления кривых изменение давления существенного влияния не оказывает.

Для области неустойчивости проведена проверка работоспособности нескольких моделей нестационарных тепловых процессов, разработанных известными в литературе методами.

Так, например, для участка пиков (рис. 7+9) проверялись модели, основанные как на временной зависимости теплоперетоков от НТ в гелий и подложку, так и на концепции динамических процессов испарения некоторого слоя гелия. Однако вследствие малой величины постоянной времени прогрева подложки ( $\sim 0,5$  мс) и сложности комплекса взаимосвязей характеристик пиков с условиями эксперимента эти модели оказались неработоспособными.

Что касается явления ветвления кривых  $\Delta T(t)$  в ОН (рис. 4+6), то качественная интерпретация этого факта отвечает статистическому характеру кризиса. Получение количественных характеристик этого явления (взаимосвязи мощности и температуры со временем начала и направлением развития процесса) в рамках известных подходов к нестационарной теплопередаче не представляется возможным.

В свою очередь объяснить возникающие через 5+10 с после наброса мощности интенсивные незатухающие колебания температуры (рис. 10) с общепринятой точки зрения также не удается.

В связи с этим сделана попытка объяснить и смоделировать некоторые наблюдаемые процессы на основе выводов теории нелинейных волн. Получены предварительные обнадеживающие результаты, однако подробное обсуждение этого вопроса выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, обнаружена область неустойчивости, в пределах которой наблюдается ряд нелинейных нестационарных эффектов, которые необходимо учитывать при разработке сверхпроводящих магнитных систем СМС. Так, в ряде случаев возможна генерация нормальной зоны при нагрузках, которые, казалось бы, приводят лишь к установлению стационарного пузырькового кипения. Кроме того, существующее мнение о прекращении нестационарных тепловых процессов через 100 мс при любых величинах набрасываемой мощности  $W$  несправедливо, по крайней мере,

для рассмотренных условий эксперимента. Между тем именно это значение времени, а также другие результаты работы Стюарта <sup>7/3</sup>, обсуждавшейся выше, служат исходными данными известных моделей нестационарных процессов в СМС. В качестве одного из примеров можно привести работу <sup>7/7</sup> где на основе данных Стюарта \* и посылки о прекращении всех нестационарных тепловых процессов за интервал 100 мс строится модель распространения нормальной зоны в сверхпроводнике в условиях нестационарной теплопередачи, что может привести к неадекватным результатам.

#### Литература

1. Шелаев И.А. и др. Препринт ОИЯИ, Р9-83-582, Дубна, 1983.
2. Инкин В.Д., Минашкин В.Ф., Филиппов Д.П. Сообщение ОИЯИ, 8-85-756, Дубна, 1985.
3. Steward W.G. Int.J.Heat and Mass Transfer, 1978, vol.21, No.7, p.863-874.
4. Kolač M., Neganov B.S., Saling S. J.Low Temp. Phys., 1985, vol.59, No.5/6, p.547-560.
5. Gardner J.W., Anderson A.C. J.Appl.Phys., 1979, vol.50, No.5, p.3012-3014.
6. Григорьев В.А., Павлов Д.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М., "Энергия", 1977.
7. Funaki K. et al. Cryogenics, 1985, vol.25, No.3, p.139-145.
8. Ito T., Kubota H., Uesono M. Proc. Xith. Int.Cryog. Engng. Conf., 1986, West Berlin.
9. CAMAC Prod.Guide ESONE/ECA, JRS-CBNM B-2400, Geel, 1984.

\* Аналогичные данным Стюарта результаты получены в более поздней работе <sup>7/8</sup>.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 августа 1986 года.

Микляев В.М. и др.

P8-86-583

Нелинейные эффекты при моделировании тепловых режимов сверхпроводящих магнитов в условиях импульсного энерговыделения

Представлены результаты экспериментального моделирования тепловых режимов сверхпроводящего магнита погружного типа при импульсных тепловыделениях. Результаты получены в интервале времен 10 мкс — 1 мин с временным разрешением 50 мкс и более в диапазонах удельных тепловых потоков 100 — 10000 Вт м<sup>-2</sup> и давлений 0,06 — 0,18 МПа. При значениях мощностей импульсов, близких к величине стационарной критической нагрузки в соответствующих условиях, получены качественно новые данные о нестационарных процессах теплопередачи к гелию, которые необходимы для анализа работы сверхпроводящих магнитных систем.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Miklyaev V.M. et al.

P8-86-583

Nonlinear Effects at Superconducting Magnet Heat Regimes Modelling Under Pulse Energy Release

The results of experimental modeling of heat regimes of superconducting magnet in the pooling mode of cooling under pulse energy releasing are presented. These results are obtained in 10 μs - 1 min time range with 50 μs and more time resolution at 100 to 10000 W/m<sup>2</sup> heat flux values for 0.06 - 0.18 MPa pressures. For pulse power values near to the stationary critical loading under corresponding conditions the qualitatively new data on transient heat transfer to helium are obtained. The importance of presented data for calculations of superconducting magnetic systems is shown.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986