

SI18806390

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ - ОУНК

И Ф В Э 87-174
ОУНК

17/

А.Г.Абрамов, А.И.Агеев, А.Б.Балуев, Ю.Г.Божко,
А.Г.Дайковский, А.В.Жирнов, А.В.Тарасов

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПОПЕРЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В СП-МАГНИТАХ УНК
В РЕЖИМАХ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ И ОТОГРЕВА

Аннотация

Абрамов А.Г. и др. Расчетный анализ поперечных тепловых процессов в СП-магнитах УНК в режимах захолаживания и отогрева: Препринт ИФВЭ 87-174. - Серпухов, 1987. - 12 с., 8 рис., библиогр.: 2.

В работе представлены результаты численного анализа тепловых процессов в поперечном сечении СП-диполя УНК в режимах захолаживания и отогрева. Исследовано влияние коэффициентов теплоотдачи в охлаждающих каналах и термического сопротивления между бандажом и ярмом на продолжительность поперечных тепловых процессов в диполе. Показаны особенности температурного поля в поперечном сечении СП-диполя и даны температурные перепады в элементах конструкции.

Abstract

Abramov A.G. et al. Calculational Analysis of Transverse Heating Processes in UNK Superconducting Magnets in Cooling Down and Warming up Modes: IHEP Preprint 87-174. - Serpukhov, 1987. - p. 12, figs. 8, refs.: 2.

The results of numerical analysis of heating processes in the cross section of the UNK superconducting dipole in cooling down and warming up modes are presented in the paper. The influence of the heat transfer coefficient and thermal resistance between the windings and the yoke on the duration of heating processes in the dipole has been investigated. The peculiarities of the temperature field in the SP-dipole cross section have been exhibited and the temperature drops in the units are quoted.

В работе /1/ была представлена конечно-элементная методика численного моделирования температурных полей в поперечном сечении (рис.1а) сверхпроводящего (СП) дипольного магнита УНК в процессах захлаживания и отогрева. На рис.1б изображена конечно-элементная сетка, описывающая рассматриваемую конфигурацию сечения диполя. Сетка получена с помощью генератора, входящего в программное обеспечение задачи /1/. Выполненная экспериментальная проверка методики подтвердила ее достоверность. С помощью этого программного обеспечения были рассчитаны продолжительности поперечных процессов в режимах захлаживания и отогрева плеча СП-магнитов УНК. Вместе с тем детального анализа температурных полей и градиентов в работе /1/ не проводилось. В свою очередь, и продолжительность процессов, и распределения температур в поперечном сечении магнита зависят от интенсивности теплообмена в каналах охлаждения и величины термических сопротивлений между элементами конструкции.

Целью данной работы является изучение влияния этих факторов на продолжительность поперечных тепловых процессов и на развитие температурных полей и перепадов.

При расчетах так же как и в работе /1/ учитывалась зависимость теплофизических свойств материалов от температуры. Для режима захлаживания температура хладагента принималась равной 4,5 К, начальная температура магнита - 290 К. При отогреве температура греющего потока составляла 290 К, начальная температура магнита - 4,5 К. Процессы захлаживания и отогрева считались законченными при температурах магнита соответственно 4,7 и 283 К.

Для анализа процессов были выбраны значения коэффициентов теплоотдачи в гелиевых каналах СП-магнита (рис.1а) $\alpha = 100, 300, 600, 1000, \infty \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Для реализации значения $\alpha = \infty$ на поверхности охлаждающих каналов принималась постоянная температура равная тем-

пературе хладагента. Продолжительности процессов, рассчитанные для этого случая, являются минимально возможными для данной конструкции СП-магнита.

Между бандажом и ярмом в магните имеется (рис.1а) термическое сопротивление – зазор, в котором находится газообразный гелий. В общем случае размеры зазора и теплофизические свойства гелия, а следовательно, и величина термического сопротивления в режимах захлаживания и отогрева изменяются. Учет корректно эти изменения очень сложно. Поэтому для анализа можно ограничиться предельными значениями величины термического сопротивления: идеальный контакт и идеальная изоляция.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССОВ

Изменение температуры точки А (рис.1а) во времени для захлаживания и отогрева в зависимости от величины коэффициента теплоотдачи представлено на рис.2. При захлаживании (рис.2а) эта температура будет максимальной в сечении магнита, а при отогреве (рис.2б) – минимальной. Расчеты выполнены в предположении, что ярмо и бандаж полностью теплоизолированы друг от друга. Видно, что как качественно, так и количественно, процессы захлаживания и отогрева для поперечного сечения СП-дипольного магнита различаются между собой. Такой характер процессов объясняется нелинейной зависимостью теплофизических свойств материалов от температуры. В конце процесса захлаживания тепловой поток, отводимый с поверхности каналов охлаждения, уменьшается вследствие уменьшения разности температур между стенкой и хладагентом, но теплоемкость материалов магнита с понижением температуры уменьшается еще быстрее. Это приводит к тому, что процесс захлаживания при низких температурах ускоряется. При отогреве наблюдается обратная ситуация: в конце процесса при уменьшении разности температур между стенкой и греющим газом теплоемкость материалов увеличивается и процесс отогрева замедляется.

Количественные оценки влияния теплоотдачи в каналах магнита на продолжительность поперечных тепловых процессов можно получить, если отнести времена процессов, рассчитанные при различных значениях коэффициентов теплоотдачи, к минимально достижимому времени

Эти зависимости приведены на рис.3. Из них следует, что на продолжительность процессов захлаживания и отогрева теплоотдача в каналах СП-магнита оказывает различное влияние. Так, например, при уменьшении значений коэффициентов теплоотдачи от $\alpha = \infty$ до $\alpha = 300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ увеличение продолжительности захлаживания не превышает 50%, а увеличение времени отогрева составит уже 240%. При дальнейшем уменьшении α продолжительность процессов резко возрастает. Эти результаты позволяют оценить эффективность поперечных тепловых процессов для режимов отогрева и захлаживания плеча СП-магнитов УНК. Например, для полученных в [1] значений продолжительности процессов ремонтного периода — отогрев 3 час., захлаживание 1,5 час., величина массового расхода гелия через СП-магниты составляла соответственно 0,110 и 0,140 кг/с. Это соответствует величинам коэффициентов теплопередачи при отогреве ~ 1000 и при захлаживании $\sim 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности поперечных тепловых процессов в этих режимах.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕЖДУ БАНДАЖОМ И ЯРМОМ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССОВ

Были рассчитаны продолжительности процессов в поперечном сечении диполя для двух предельных случаев: идеальный контакт и идеальная теплоизоляция. Полученные результаты для режима захлаживания представлены на рис.4. Увеличение времени процесса в случае идеальной изоляции не превышает 45% для всех значений коэффициента теплоотдачи. Для режима стогрева это различие несколько меньше — не более 35%.

В случае идеальной теплоизоляции можно определить во сколько раз продолжительность процессов в ярме больше продолжительности процессов в обмоточном блоке. Результаты таких расчетов приведены на рис.5. Видно, что определяющим для всех режимов является продолжительность процессов в ярме. Действительно, во время экспериментального исследования процесса охлаждения модуля СП-диполя в жидком азоте [1] были проведены измерения температурных полей при закрытых обводных каналах (рис.1а), т.е. охлаждение модуля осуществлялось только через центральный канал. Продолжительность процесса при этом возросла более, чем в 4 раза.

Созданное программное обеспечение позволяет учитывать также наличие других термических сопротивлений (рис.1а): между слоями обмотки, между обмоткой и бандажом, между обечайкой и ярмом, а также между обмоткой и кладангентом (например, электрическая изоляция кабеля обмотки). Однако, как показали расчеты, влиянием этих термических сопротивлений на продолжительность поперечных тепловых процессов можно пренебречь. Если же требуется рассчитать температурное поле для последующего анализа температурных напряжений и деформаций в элементах конструкции магнита, это влияние нужно учитывать.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПЕРЕПАДЫ В ЭЛЕМЕНТАХ СП-МАГНИТА

Изменения температурных перепадов ΔT между точками А и В (рис.1а) во времени показаны на рис.6. Видно, что как для режима захлаживания, так и для режима отогрева максимальные значения ΔT достигаются в первые 20 мин процессов. Значительное влияние на ΔT оказывает коэффициент теплоотдачи в каналах охлаждения. Для процессов с $\alpha \ll 100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ кривые ΔT не имеют ярко выраженного максимума.

Значения максимальных температурных перепадов между точками А и С ярма и точками Д и Е бандаж для захлаживания и отогрева приведены на рис.7. Анализ этих результатов позволяет сделать вывод о том, что температурные перепады в бандаже достигают существенно больших значений чем в ярме.

Наибольшую наглядность имеет представление развивающихся температурных полей в виде призограмм. На рис.8 показано температурное распределение в 1/4 части СП-диполя в режиме захлаживания для момента времени $T = 20$ мин, построенное с помощью графического пакета АТОМ-84/2/. Видно, что температурный перепад по СП-обмотке практически отсутствует, что объясняется высокой теплопроводностью медной матрицы сверхпроводящих проволок. Расчет был выполнен для случая охлаждения газообразным гелием СП-диполя УНК расходом 140 г/с.

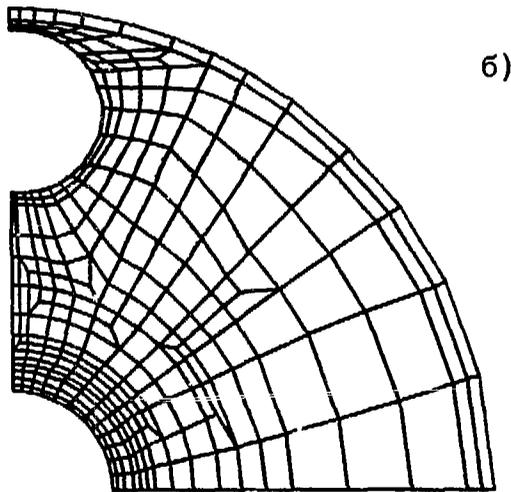
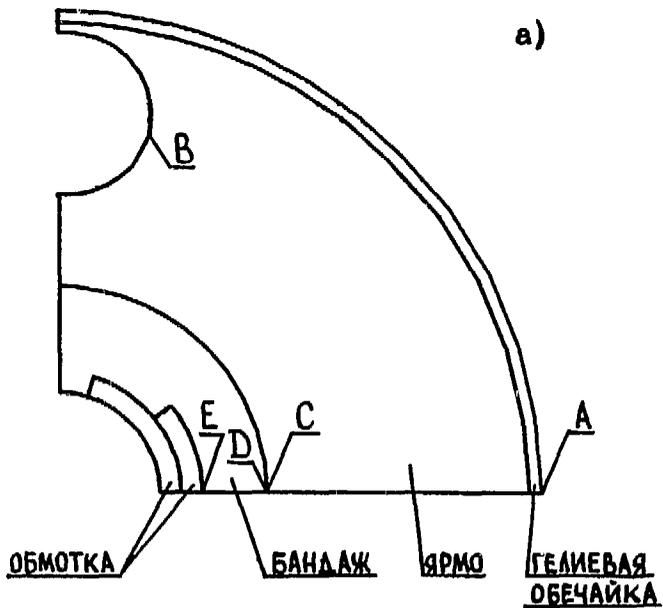


Рис. 1. а) 1/4 часть поперечного сечения СП-дипольного магнита УНК с холодным ярмом, б) Конечно-элементная сетка поперечного сечения диполя.

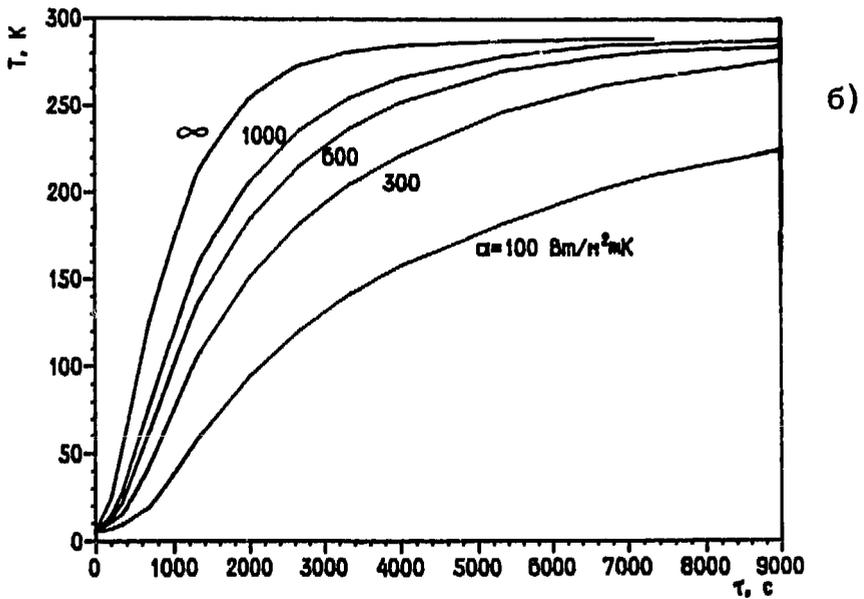
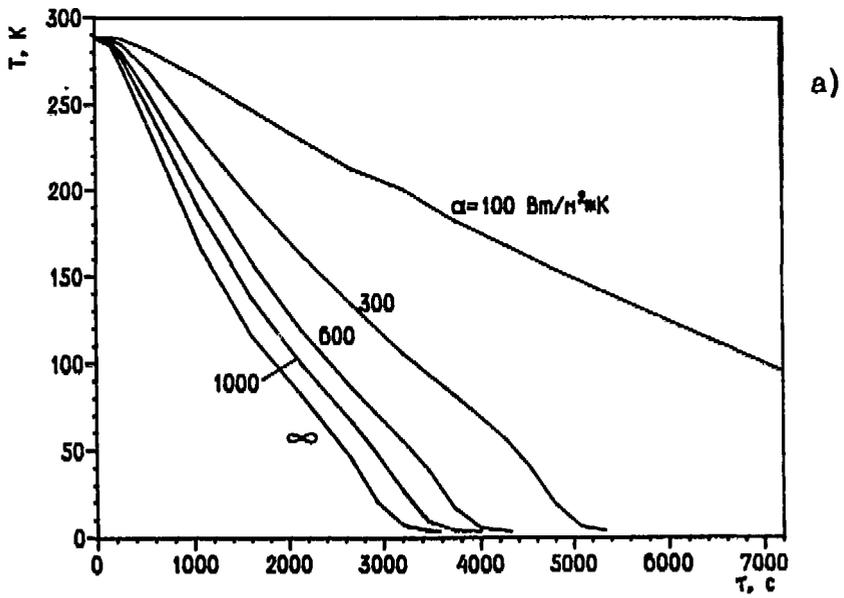


Рис.2. Характерные температурные кривые для точки А поперечного сечения: а) при захлаживании, б) при отогреве.

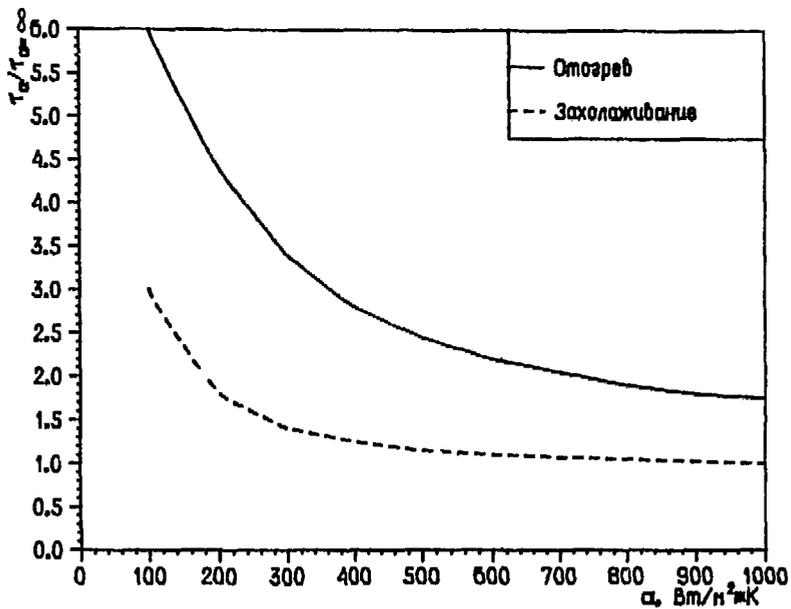


Рис. 3. Приведенные временные характеристики процессов захлаживания и отогрева.

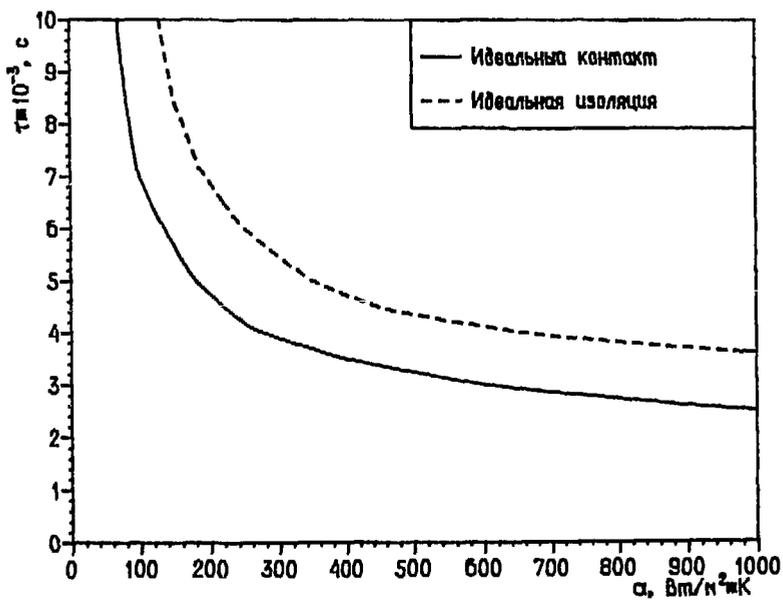


Рис. 4. Влияние термического сопротивления на продолжительность захлаживания.

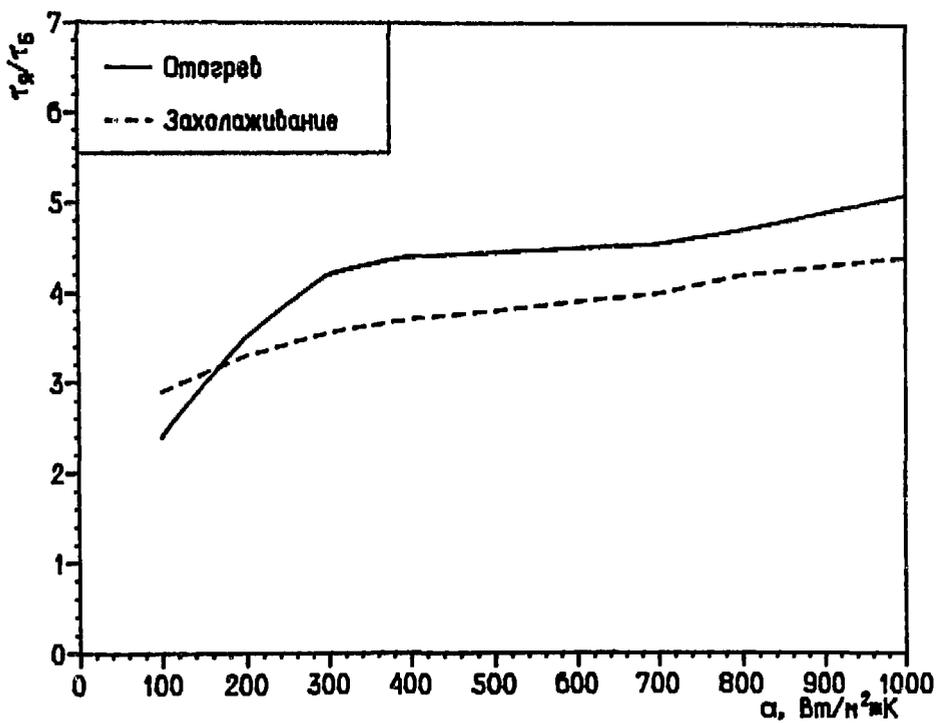
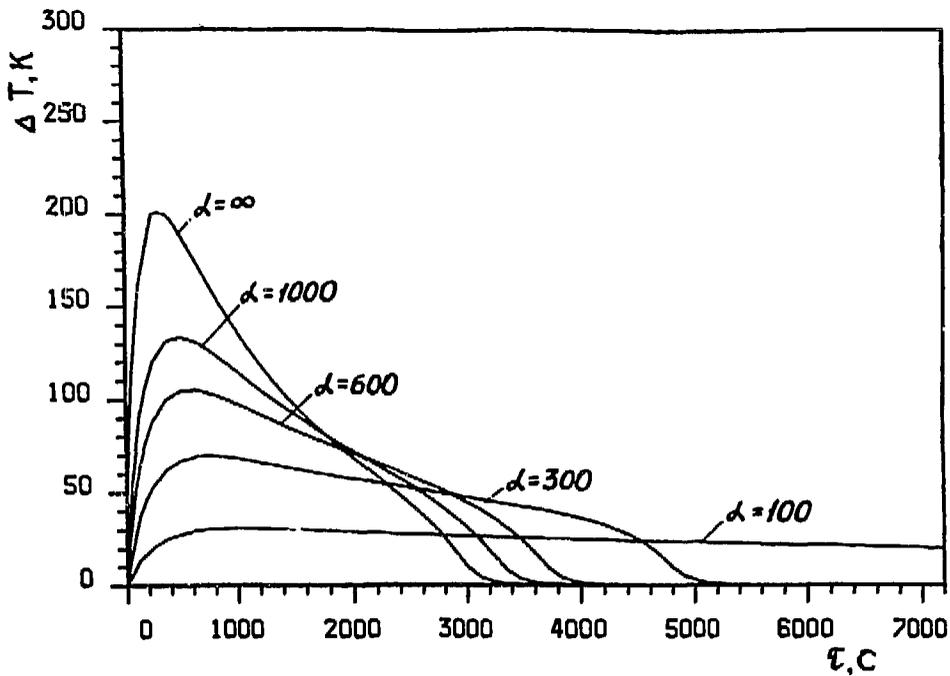
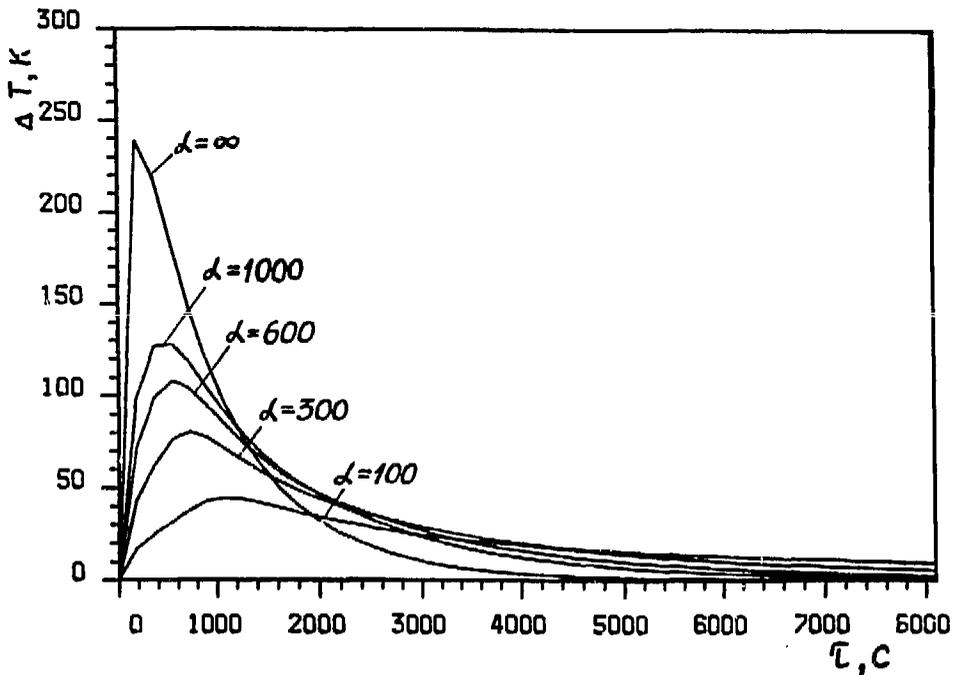


Рис. 5. Отношение продолжительности процессов захлаживания и отогрева ярма и бандажа.



a)



б)

Рис. 6. Характерные зависимости температурных перепадов ярма:
 а) при захолаживании, б) при отогреве.

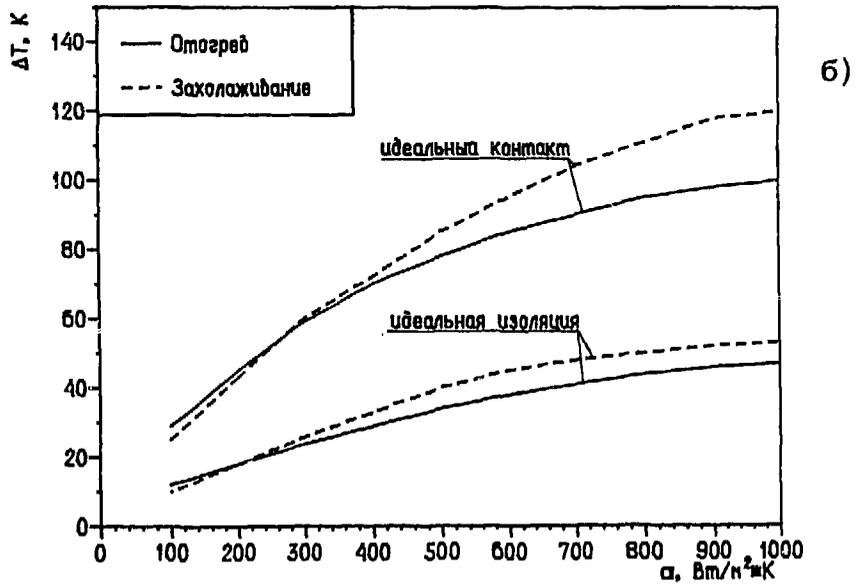
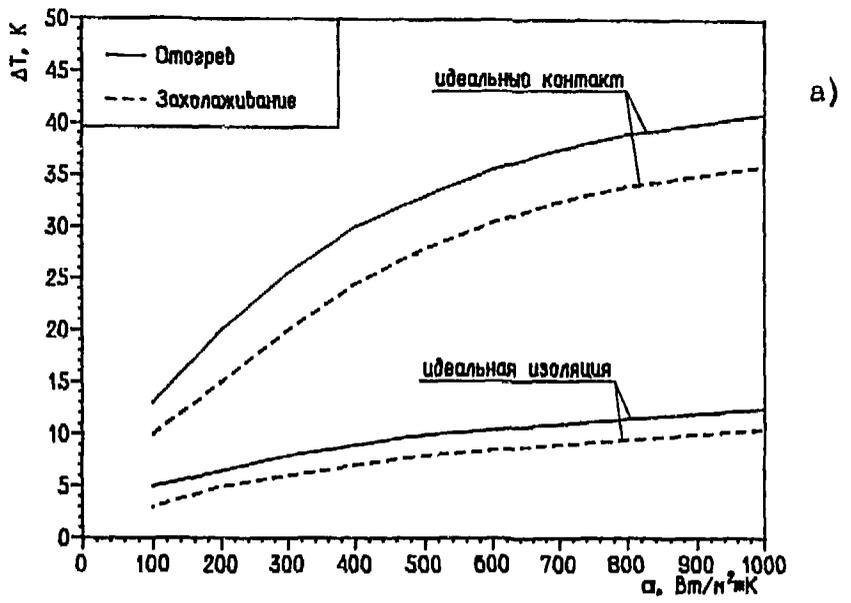


Рис. 7. Значения максимальных радиальных температурных перепадов при захлаживании и отогреве: а) для ярма, б) для бандаж

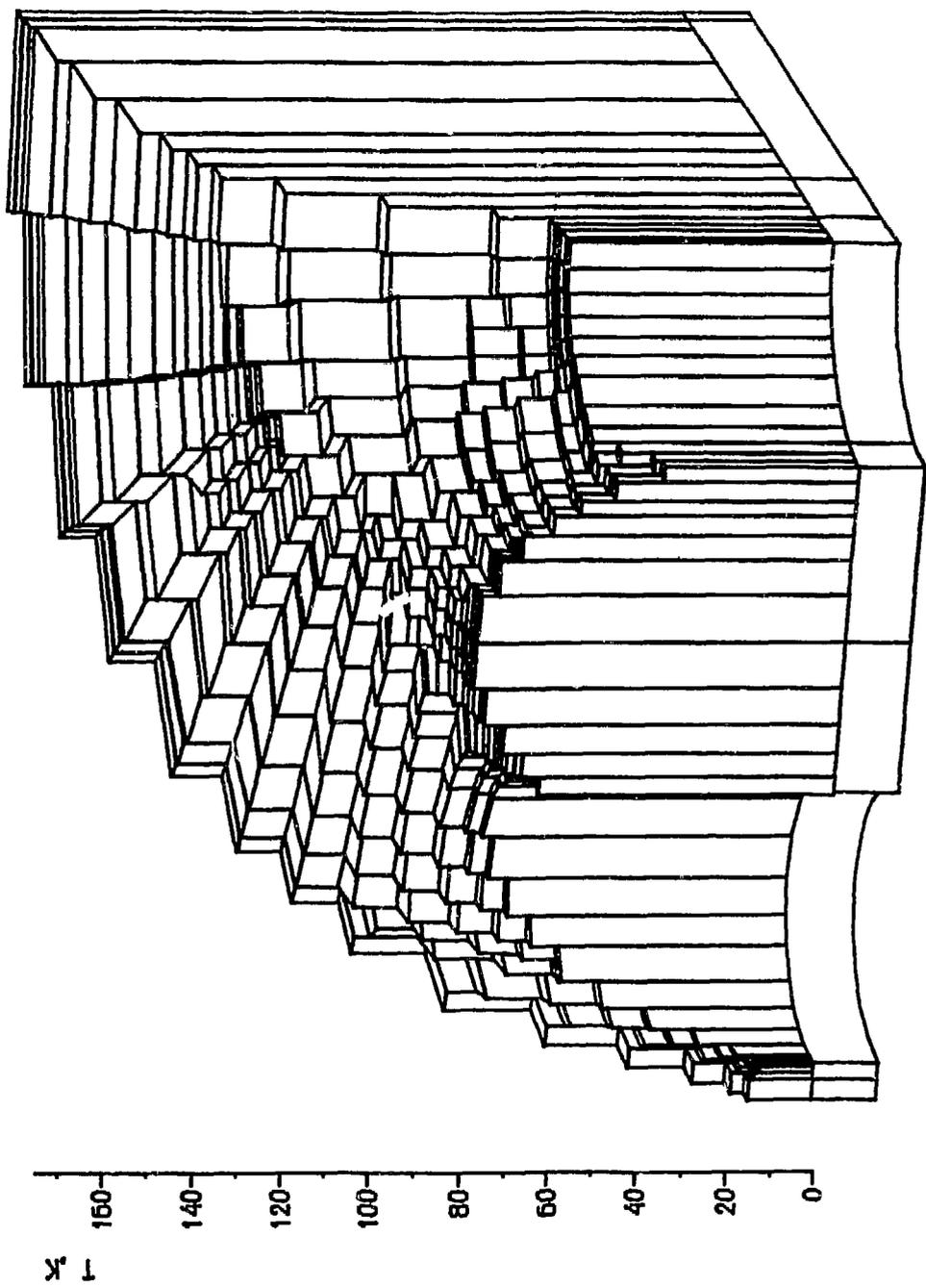


Рис. 8. Призмোগрамма температурного поля.

ВЫВОДЫ

1. При реализации режимов захлаживания и отогрева плеча СП-магнитов УНК в ремонтном периоде необходимо обеспечить такой массовый расход гелия по каналам прямого потока, чтобы при захлаживании значения коэффициентов теплоотдачи были не ниже $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ а при отогреве – не ниже $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Это позволит иметь для плеча СП-магнитов время поперечных тепловых процессов существенно меньше времени продольных процессов.

2. Наличие термического сопротивления между бандажом и ярмом для данной конструкции поперечного сечения СП-диполя с холодным ярмом не приводит к существенному увеличению продолжительности процессов захлаживания и отогрева.

3. Определяющим для продолжительности поперечных процессов является время захлаживания и отогрева ярма. Поэтому повышение эффективности процессов для ярма позволит уменьшить соответственно и время процессов для сечения в целом. Уменьшение времени процессов для ярма, при неизменных его теплофизических свойствах возможно либо за счет изменения положения обводных каналов, либо за счет увеличения их теплообменных периметров.

4. Температурные перепады в поперечном сечении СП-диполя для рассчитанных процессов при значениях коэффициентов теплоотдачи в каналах магнита $\alpha > 100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ достигают максимальных значений в течение первых 20 мин. При $\alpha < 100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ температурные перепады не имеют выраженного максимума.

Список литературы

1. Абрамов А.Г., Агеев А.И., Балугев А.Б. и др. Препринт ИФВЭ 86-201. – Серпухов, 1986.
2. Кочин В.Н., Самарин А.В. Препринт ИФВЭ 85-137. – Серпухов, 1985.

Рукопись поступила 28 июля 1987 года.

А.Г.Абрамов и др.

Расчетный анализ поперечных тепловых процессов в СП-магнитах УНК
в режимах захлаживания и отогрева.

Редактор М.Л.Фоломешкина, Технический редактор Л.П.Тимкина.
Корректор Л.Ф.Васильева.

Подписано к печати 8.10.87. Т-19895. Формат 60х90/16.
Офсетная печать. Печ.л. 0,75. Уч.-изд.л. 0,85. Тираж 250.
Заказ 882. Индекс 3624. Цена 13 коп.

Институт физики высоких энергий, 142284, Серпухов Московской обл.

