

М491147

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Архаров Иван Алексеевич

ТЕРМОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ
СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИХ
КРИОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТ 2 ДО 20 К

специальность 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники
01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном
техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель:

доктор технических наук
профессор Крутов В. И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
профессор Улыбин С. А.
кандидат технических наук
Саверин В. Н.

Ведущее предприятие: НПО "Энергия" г. Калининград Московской
области

Защита диссертации состоится "25" июня 1990 г. в
14 час. на заседании Специализированного совета К. 053.15.05
в Московском государственном техническом университете им.
Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская набере-
жная, д. 1.

Библиотеке МТУ.

Получить по адресу:
г. 5.

1990 г.

С. И. Ефимов

М 491147

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы, в связи с новыми требованиями, предъявляемыми к устройствам и аппаратам криогенной техники, магнитное охлаждение перешло из разряда перспективного в разряд практического применения. Принципы адиабатного размагничивания, методы и устройства, позволяющие получать холод на разных температурных уровнях, легли в основу нового направления в развитии криогенной техники. Предпринимаются попытки использовать магнитное охлаждение в космической технике, оптике, электронике и других отраслях промышленности.

В нашей стране и за рубежом накоплен значительный опыт по созданию и эксплуатации магнитокалорических криогенных генераторов (ММКГ) с парамагнитными рабочими телами, предназначенных для работы в диапазоне температур 1,8...20 К. Некоторые зарубежные фирмы, например **Astronotica Corporation**, приступили к изготовлению серийных промышленных магнитных охладителей.

Основными препятствиями, сдерживающими дальнейшее развитие ММКГ являются: недостаточное совершенство магнитных систем; отсутствие полной информации о теплофизических и магнитных свойствах рабочих тел, в том числе и какой-либо теории прогнозирования этих свойств; практически полное отсутствие критериев оценки подбора рабочих тел ММКГ; трудности рекуперации теплоты.

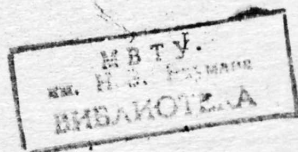
Достаточно эффективные магнитные системы, способные генерировать поля напряженностью 5...6 Тл, созданы только для температур ниже 12 К. Сегодня именно в этом температурном диапазоне ММКГ обладают наибольшей эффективностью. Если активно проводимые работы в области высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) позволят создать магнитные поля 5...6 Тл без затрат дорогих криогенных жидкостей, таких как гелий и водород, то в этом случае ММКГ смогут конкурировать с уже существующими холодильными машинами, обладая при этом высокой эффективностью, хорошей компактностью и малыми энергозатратами. Такой прогноз правомерен, так как почти 80 % потребляемой энергии ММКГ расходуется на обеспечение магнитной системы, а ее масса составляет до 60 % общей массы ММКГ.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1491147

Архаров И.А. Терромагнитные



Практически полное отсутствие систематических исследований твердых тел, обладающих магнитокалорическим эффектом (МК-эффект) и пригодных к использованию в МКГ, обусловило существующий на сегодня недостаток информации об их свойствах. Большинство исследователей и конструкторов применяют в качестве рабочего тела МКГ гадолинийгаллиевый гранат (ГГГ), который наряду со своими достоинствами имеет ряд недостатков. В 1985 году Барклайем было показано, что составное рабочее тело, выполненное из различных магнетиков с постепенно возрастающей температурой магнитного фазового перехода, обладает большей эффективностью, чем монокристаллическое рабочее тело в том же диапазоне температур. Это обусловлено тем, что практически все тепловые и магнитные характеристики материала достигают своих экстремальных значений вблизи магнитного фазового перехода, проявляющегося при строго определенной температуре.

Вышеизложенное определяет актуальность настоящей работы, которая посвящена изучению таких наиболее важных (с позиций магнитного охлаждения) свойств рабочих тел, как магнитокалорический эффект, намагниченность, теплоемкость и энтропия.

Цель работы — определение теплофизических и магнитных свойств рабочих веществ со структурой граната магнитокалорических криогенераторов (МКГ) в диапазоне температур 2...20 К и выработка критериев оценки их пригодности для магнитного охлаждения.

Задачи работы:

1. Анализ существующей информации о рабочих веществах МКГ и определение наиболее перспективных классов соединений.
2. Создание экспериментальной установки для исследования магнитокалорического эффекта твердых тел в диапазоне температур 2...300 К и напряженностей магнитного поля до 7 Тл.
3. Разработка методики определения зависимостей теплоемкости и энтропии рабочих тел МКГ от температуры в магнитном поле на основании измерений МК-эффекта и намагниченности.
4. Проведение экспериментальных исследований МК-эффекта и намагниченности рабочих веществ МКГ в рассматриваемом

диапазоне температур и напряженностей магнитного поля. Построение на основании разработанной методики диаграмм $C - T$ и $S - T$ для магнетиков.

5. Создание экспериментальной установки, позволяющей моделировать реальные циклы МКГ в диапазоне температур $2...20$ К при напряженности магнитного поля $0...7$ Тл.

Научная новизна. Диссертация является целенаправленным, завершенным исследованием терромагнитных свойств рабочих веществ МКГ. Разработана оригинальная методика определения зависимостей теплоемкости и энтропии рабочих тел МКГ от температуры в магнитном поле на основании измерений МК-эффекта и намагниченности. Проведены систематические измерения МК-эффекта и намагниченности в сильнозамещенных ферритах-гранатах Gd , Dy , Ho и Er с ионами замещения Ga и Al . Построены диаграммы $C-T$ и $S-T$ для магнетиков. Установлено влияние технологии изготовления на структуру и свойства магнетиков. Проведен рентгеноструктурный анализ образцов и оценка дисперсности.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Создана установка, позволяющая проводить исследования МК-эффекта в диапазоне температур $2...300$ К при напряженности магнитного поля $0...7$ Тл.
2. Получена новая научная информация о терромагнитных свойствах сильнозамещенных ферритов-гранатов как рабочих веществ МКГ. Проведен анализ структуры спеченных поликристаллов и обоснована более совершенная технология их изготовления.
3. Разработана методика и компьютерная программа расчета теплофизических свойств магнетиков, основанная на экспериментальных данных по МК-эффекту, намагниченности и новых теоретических обобщениях.

Результаты работы внедрены в НПО "Криогенмаш" г.Балашиха при проектировании и расчетах конструкций МКГ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-технических семинарах кафедр "Криогенная техника и кондиционирование" и "Теоретические

основы теплотехники" МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По материалам работы опубликовано 3 статьи, 2 отчета о НИР и получено 2 положительных решения по заявкам на изобретение.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и приложений, содержит 109 страниц машинописного текста, 12 страниц таблиц и 85 страниц рисунков. Список литературы содержит 130 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и сформулированы цель и задачи исследования, а также положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе содержится краткое описание физических принципов получения низких температур с использованием магнитокалорического эффекта. Проведен анализ существующей информации о рабочих телах ММКГ и определены наиболее перспективные классы соединений тяжелых редкоземельных металлов (ТРЗМ). Описаны и разобраны основные методы исследования Мк-эффекта, теплоемкости, теплопроводности, а также основные типы конструкций ММКГ. На основании проведенного анализа определены конкретная цель и задачи настоящей работы.

Первые сообщения о новом феномене появились в 1918 г., их сделали Вейс и Пиккард. Их работа касалась исследования поведения никеля в магнитном поле. Температура никеля менялась при введении его в магнитное поле. Так был открыт магнитокалорический эффект (Мк-эффект). В 1926 г. впервые Джиок и Дебай предложили использовать Мк-эффект для получения низких температур.

Все последующие работы проводились по трем основным направлениям:

- исследование различных химических соединений, солей и кристаллов на наличие Мк-эффекта и определение их теплофизических, электрических и магнитных свойств;
- разработка и формулирование теоретических и термодинамических основ адиабатного размагничивания;
- создание и исследование конкретных устройств, реали-

зующих принципы магнитного охлаждения.

Большое количество ученых таких, как Курти, Вейсс, Неель, Хир, Веббер, Спур, Доунт, Клеменс, Гортер и др. занимались исследованием свойств магнетиков. Проводились всесторонние исследования. Изучались тепло- и электропроводность при низких температурах и в магнитном поле, магнитная восприимчивость, МН-эффект, теплоемкость, камагнитичность и многие другие свойства. Ультранизкие температуры и магнитные поля обусловили необходимость создания новых методов исследования свойств. Исторический обзор работ по адиабатическому размагничиванию парамагнитных солей сделал Хадсон.

В настоящее время исследованием терромагнитных свойств твердых тел занимаются в МГУ им. Ломоносова (Белов К.П., Никитин С.А., Андреев А.С. и др.).

Одновременно с экспериментальным исследованием свойств рабочих тел, велись работы по теоретическому и термодинамическому описанию явлений и процессов в них происходящих. Наиболее существенный вклад в этой области принадлежит Гортеру. Им был сформулирован новый термодинамический принцип, который заключается в том, что скорость всех необратимых процессов при температуре абсолютного нуля обращается в нуль, и разработана термодинамика адиабатного размагничивания. Гортер провел подробнейшие теоретическое и экспериментальное исследования влияния магнитного и электрического полей на энергетические уровни магнитных ионов. В наиболее полной теории антиферромагнетизма Гортера и Хаантеса, также как и в первоначальных теориях Нееля и ван-Флека, обменное взаимодействие формально учитывается введением молекулярного поля. Гортер впервые рассмотрел вопросы теплового равновесия в размагниченном образце.

Практическая реализация метода магнитного охлаждения была осуществлена в работах де-Гааза, Хира, Доунта, Ван-Гьюенса, Брауна и др. Первоначально рассматривался одноцикловой вариант устройства для достижения ультранизких температур. Первое действующее устройство для температур 1 К было создано Доунтом и Хиром. Это был первый серийно выпускавшийся магнитный рефрижератор для исследовательских целей. В настоящее время ведутся активные исследования в этой области как в нашей стране, так и за рубежом. Наиболее известны

работы таких исследователей, как Барклай, Стиерт, Киттель, Розенблюм (США), Лаказ, Берандер, бон Мардьон (Франция), Хашимото, Нумазава, Шино, Хакураку (Япония) и другие. В нашей стране проблемами магнитного охлаждения активно занимаются в Московском Энергетическом Институте (Бродянский В.М., Синяевский Ю.В.), в Московском Государственном Техническом Университете (Архаров А.М., Жердев А.А.), в НПО "Криогенмаш" г. Балашиха (Шапошников В.А., Михайлов А.А. в НПО "Микрокриогенмаш" г.Омск (Грезин А.К., Карагузов В.И., Горовой Ю.М.) и другие.

На основании анализа существующей информации были определены классы наиболее перспективных веществ рис.1. и выбраны образцы кристаллов для настоящего исследования, сформулированы задачи работы.

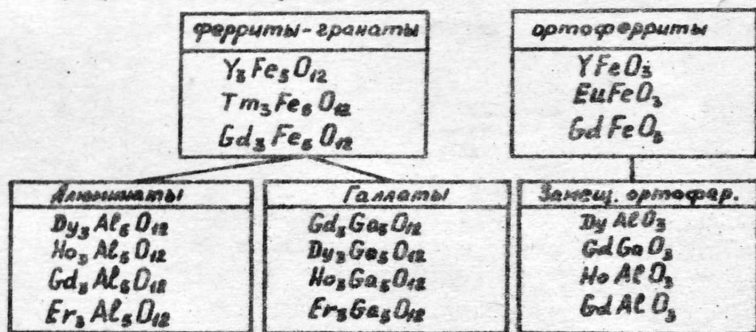


Рис.1. Наиболее перспективные классы соединений тяжелых редкоземельных металлов.

Во второй главе приводится подробное описание экспериментального стенда для измерения МК-эффекта и результаты эксперимента для соединений Gd, Dy, Ho и Er . Зависимости МК-эффекта от температуры для $Gd_3Ga_5O_{12}$ и $Er_3Al_5O_{12}$ представлены на рис.2 и рис.3. Проведено сравнение между различными соединениями по величине МК-эффекта. Выявлены основные факторы эксперимента, определяющие погрешность измерений и приведен подробный расчет. Погрешность измерительного стенда

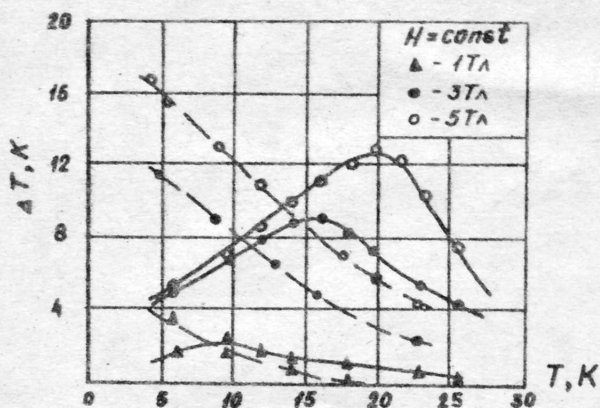


Рис. 2. Магнитокалорический эффект в гранате $Gd_3Ga_5O_{12}$.
 — — — — — размагничивание; — — — — — намагничивание.

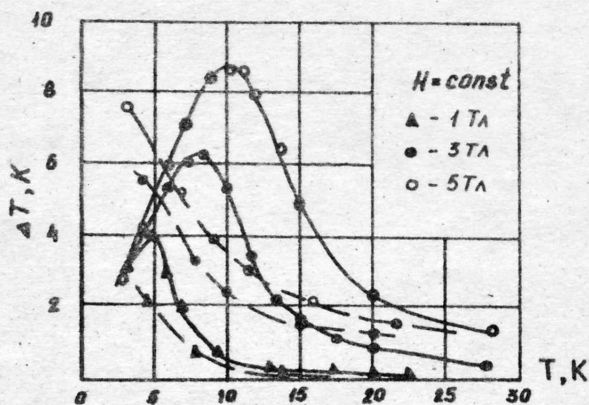


Рис. 3. Магнитокалорический эффект в гранате $Er_3Al_5O_{12}$.
 — — — — — размагничивание; — — — — — намагничивание.

(средства измерений) описывается двухчленной формулой

$$\delta(x) = \pm \left[1,5 + 2,5 \frac{x}{x_m} \right], \%$$

и не превышает значения 5 % на границах диапазона измерений.

Приведены результаты измерений намагниченности в гранатах Gd , Ho , Er . Зависимости намагниченности от температуры и напряженности магнитного поля для соединений $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ) и $Er_3Al_5O_{12}$ приведены на рис.4, 5 и рис.6. Обнаружено наличие петли магнитного гистерезиса в ГГГ при температурах ниже 10 К (рис.5), которая исчезает при увеличении напряженности магнитного поля выше 3 Тл.

Обсуждается технология изготовления моно- и поликристаллов, а также ее влияние на термомагнитные свойства. Приводятся результаты рентгеноструктурного анализа образцов и визуальные снимки структуры, полученные на растровом электронном микроскопе.

Предлагается методика косвенного определения теплоемкости через намагниченность и МК-эффект при температурах ниже 20 К. Магнитокалорический эффект является прямым следствием первого и второго законов термодинамики. Поэтому из соотношения

$$\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S = - \frac{T}{C_M} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H,$$

легко получить

$$C_M = - T \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H \frac{\partial H}{\partial T},$$

где C_M - магнитная теплоемкость, которая в свою очередь является составляющей полной теплоемкости;

$\frac{\partial M}{\partial T}$ - намагниченность в постоянном магнитном поле;

$\frac{\partial H}{\partial T}$ - МК-эффект.

Предложенный метод позволяет получить данные по теплоемкости только в области температур выше 4,2 К, где экспериментальные исследования калорического эффекта и намагниченности относительно легко реализуемы. В области температур ниже 2 К эти эксперименты труднодоступны и требуют сверхчувствительной аппаратуры, а данные по теплоемкости необходимы во всем диапазоне температур.

Зарубежные экспериментальные исследования по определению теплоемкости до 2 К для одного из представителей семейства гранатов ДГГ, а также теоретические посылки вообще для твер-

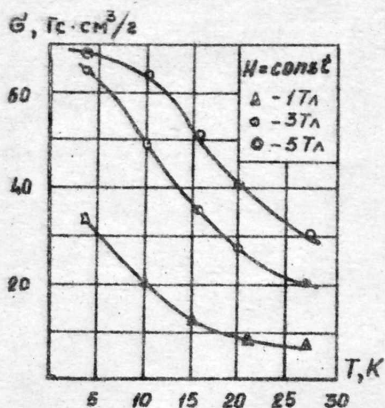


Рис. 4. Удельная намагниченность $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$.

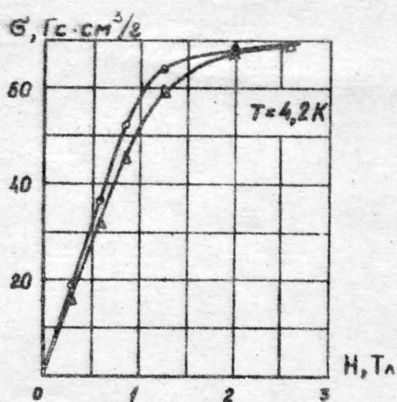


Рис. 5. Петля гистерезиса намагниченности в $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ при температуре $4,2\text{ K}$.

Δ — размагничивание;
 $\circ$ — намагничивание.

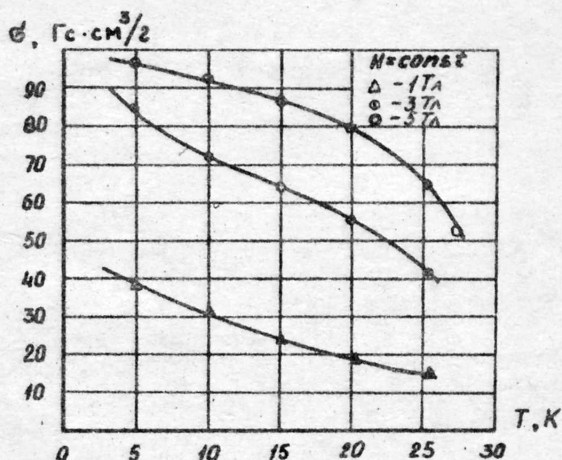


Рис. 6. Удельная намагниченность $\text{Er}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

ного тела позволили выявить сложный характер зависимости. При температурах $\sim 0,1 \pm 0,3$ К происходят процессы уже на уровне ядерного упорядочения. Именно в этой области характерно наличие аномалии Шоттки для Крамерсовских дублетов, которая проявляется как резкий пик теплоемкости, вызванный практически полным вырождением $(2J + 1)$ энергетических уровней. Исследования этой аномалии проведены в 1972г. Тейлором и Дарби. Приложенное внешнее магнитное поле снимает указанное вырождение, сдвигая пик теплоемкости в область более высоких температур и уменьшая его по абсолютной величине. Большие магнитные поля полностью сглаживают пик в низкотемпературной области и позволяют провести линейную экстраполяцию значений теплоемкости вплоть до 0 К. Поэтому предлагается следующий подход:

- Построение кривых $C-T$ в области температур выше 4,2 К при напряженности магнитных полей $H > 4$ Тл, по результатам измерений МК-эффекта и намагниченности.
- Линейная экстраполяция полученных данных по теплоемкости до 0 К.
- Построение в $S - T$ координатах соответствующих кривых, а также, используя данные по МК-эффекту (рис.2) всей диаграммы.
- При необходимости последующее перестроение $S - T$ диаграммы в $C - T$ диаграмму.

Точность описанного метода для получения диаграммы теплоемкости, с учетом погрешностей перестроения составляет 10 - 15 %, что вполне приемлемо. Точность построения $S - T$ диаграммы, определяемая аддитивными погрешностями измерений и вычислений, лежит в пределах 7...10 %. На основании предложенного метода построены диаграммы $C - T$ и $S - T$ для $GdGaGe$ и $ErAlGe$, которые приведены на рис.7, 8 и рис.9, 10. Пунктирная линия нулевого поля отражает влияние петли гистерезиса намагниченности. Изложенный метод обладает достаточной точностью и может использоваться для получения диаграмм. Приводится сравнение полученных результатов с имеющейся отечественной и зарубежной информацией. Обсуждаются критерии подбора рабочих веществ ММГ и предлагается простой экспериментальный метод определения пригодности магнетиков для адиа-

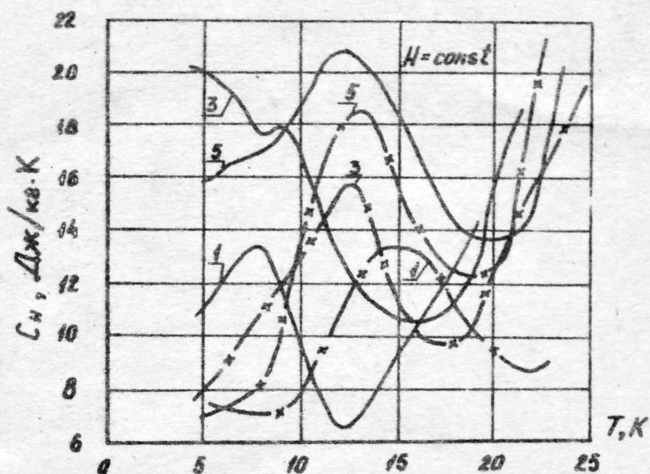


Рис. 7. Зависимость теплоемкости от температуры в гранате $Gd_3Ga_5O_{12}$.
 — поликристалл; — x — монокристалл.

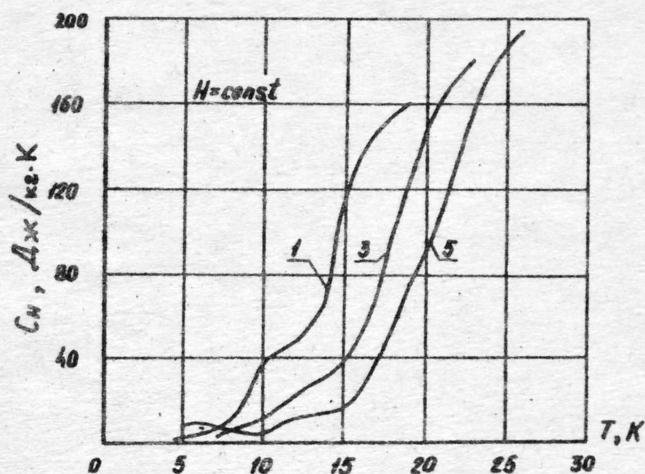


Рис. 8. Зависимость теплоемкости от температуры в гранате $Er_3Al_5O_{12}$.

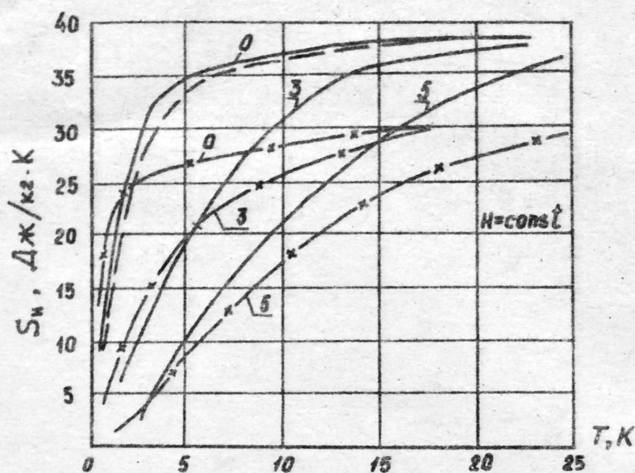


Рис. 9. Т - S диаграмма граната $Gd_3Ga_5O_{12}$.
 — — — поликристалл; — x — — — монокристалл.

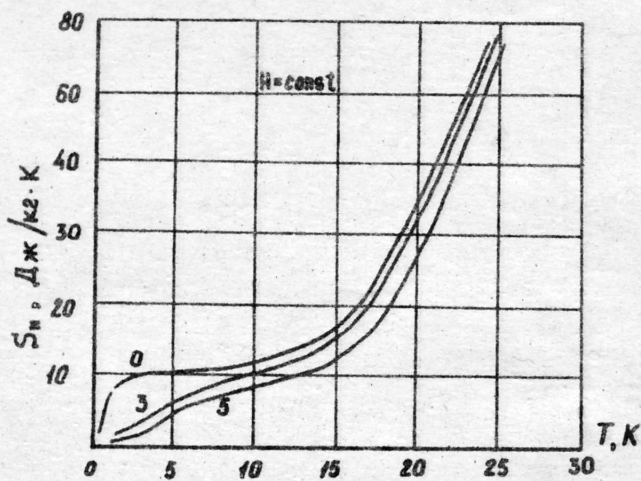


Рис. 10. Т - S диаграмма граната $Er_3Al_5O_{12}$.

батного размагничивания. Приводится обобщенное уравнение состояния магнетика.

Из проведенного в работе анализа внутренних взаимодействий в кристалле, можно сделать вывод, что для использования в качестве рабочего тела в МККГ "идеальный" парамагнетик должен иметь слабое дипольное взаимодействие, и сверхтонкое расщепление, равное нулю. При определении рабочего диапазона температур МККГ или подбора парамагнетика на данную область температуры необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$g \mu_B \cdot H \geq k_B T,$$

где k_B - постоянная Больцмана; T - температура. Только при выполнении этого условия энергия теплового движения решетки $k_B T$ не будет разрушать магнитного упорядочения в парамагнетике и, таким образом, определяется верхняя граница температурного диапазона применимости данного рабочего тела МККГ. Для известных парамагнетиков эта граница равна 20 - 25 К. Установлено, что точное знание схемы энергетических уровней имеет определяющее значение. Приближенные данные могут быть получены из исследования парамагнитной релаксации. На основании проведенного рассмотрения внутрикристаллических взаимодействий предлагается обобщенное уравнение состояния написать в виде:

$$T = [\Phi] \frac{C}{M}$$

где $[\Phi]$ - характеристическая функция, отражающая влияние внутренних взаимодействий в определенном классе твердых тел.

Эту функцию можно представить в следующем виде:

$$[\Phi] = \theta(E, \epsilon, J, S) \cdot \vartheta(a, c) \cdot z(\{i\}) \cdot H^*$$

где θ - отражает влияние электрического поля на орбитальный и спиновый момент иона;

ϑ - отражает основные кристаллографические параметры кристалла;

z - функция, отражающая обменные взаимодействия между подрешетками в кристалле;

H^* - функция локального магнитного поля.

Каждая из этих функций может быть определена из соответствующих экспериментов. Таким образом может быть получено полу-

эмпирическое уравнение состояния. К сожалению, на сегодняшний день какая-либо теория прогноза свойств магнитных материалов отсутствует. Также недостаточно научно обоснованных методов получения соединений с заранее заданными свойствами. Поэтому, определив наиболее вероятное направление поиска рабочих тел из теоретических предпосылок, остается необходимость экспериментальных исследований.

В третьей главе дается подробное описание экспериментального стенда для моделирования реальных циклов МККГ. Описана конструкция капсулы с рабочим телом и методика эксперимента. Была создана специальная установка для изучения процессов, происходящих в рабочем теле МККГ при его циклической работе. Установка была выполнена в виде вставки в базовый криостат УИС-I с вмонтированной магнитной системой. В основу была положена схема возвратно-поступательного МККГ с принудительным движением рабочего тела. Основной задачей, которая решалась в данном эксперименте, являлось определение температурного поля рабочего тела в реальном цикле. Информация об объемном распределении температуры в рабочем теле является необходимой для оптимизации его параметров исходя из реальных условий, в которых оно работает. Экспериментально реализован магнитный цикл Карно возвратно-поступательного МККГ. По результатам эксперимента определено температурное поле пакетного рабочего тела и сделаны следующие заключения:

- зная распределение температуры в рабочем теле, по заданным холодопроизводительности и температурам криостатирования и приемника теплоты необходимо проводить оптимизацию геометрических размеров рабочего тела;
- предложенная пакетная конструкция позволяет создать комбинированное из разных магнетиков рабочее тело с целью повысить объемную плотность теплового потока в различных стадиях цикла.

Проведено математическое моделирование работы МККГ и сравнение с экспериментом. Аналитически решена задача по определению температурного поля в цилиндрическом рабочем теле, с теплоизолированной боковой поверхностью при наличии теплообмена на торцах. Разработана программа-алгоритм для ЭВМ PC/AT.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ существующей информации о рабочих веществах ММКГ и определены наиболее перспективные классы соединений. Ими, в температурном диапазоне 2...20 К являются сильнозамещенные ферриты - гранаты.

2. Созданы экспериментальные установки для исследования магнитокалорического эффекта твердых тел в диапазоне температур 2...300 К и напряженностей магнитного поля до 7 Тл. Проведен анализ факторов, определяющих погрешность измерений, и выполнен подробный расчет. Погрешность средства измерений описывается двухчленной формулой

$$\delta(x) = \pm [1,5 + 2,5 \sqrt{x}] \, \%$$

и составляет не более 5 % на границах диапазона измерения.

3. Разработана оригинальная методика определения зависимостей теплоемкости и энтропии рабочих тел ММКГ от температуры в магнитном поле на основании измерений МГ-эффекта и намагниченности.

4. Проведены систематические измерения МГ-эффекта и намагниченности в сильнозамещенных ферритах - гранатах Gd , Dy , Ho и Er с ионами замещения M и Ca . Установлено, что ЗАГ при температурах ниже 5 К обладает лучшими, по сравнению с ГТТ свойствами. Полученные результаты позволяют подобрать магнетики с постоянно понижающейся температурой магнитного перехода с целью создания каскадного рабочего тела. В этом случае каждый каскад будет работать в области оптимальных параметров.

5. Получены диаграммы свойств магнетиков $S-T$ и $B-T$.

6. Установлено влияние технологии изготовления на структуру и свойства магнетиков. Проведен рентген-структурный анализ образцов и оценка дисперсности. Технология изготовления ОКБ "Горизонт" позволяет получать дешевые материалы с заданной пористостью, отличающиеся большой механической прочностью, большими значениями МГ-эффекта и намагниченности, с четкой структурой поликристалла и без примесей инородных химических элементов.

7. Создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать реальные циклы ММКГ в диапазоне температур 2...20 К при напряженности магнитного поля 0...7 Тл. Проведен контрольный эксперимент на ГТТ для цикла Карно. Осуществлено

расчетное моделирование рабочего процесса МЖГ и сравнение с экспериментальными данными. Расхождение не превышает 5 %. Создан пакет компьютерных программ, который может применяться при проектно-конструкторских расчетах МЖГ.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих материалах:

1. Архаров И.А., Горшков А.М., Жердев А.А. Исследование и использование магнитокалорического эффекта // Труды МВТУ. - 1989. - № 534. - С.44-60.
2. Поиск новых рабочих материалов и создание макетов опытных образцов магнитных охлаждающих устройств (I и II этапы): Отчет по теме Г-03 / МВТУ. - № ГР У-34073; Руководитель темы: А.М.Архаров - М., 1986. -53с.
3. Магнитокалорический эффект при метамгнитном фазовом переходе в $NdMn_2Si_2$ / С.А.Никитин, И.А.Архаров, А.М.Тишин и др. // ФТТ. - 1987. - Т.29, вып.2. - С.572-574.
4. Исследование теплофизических свойств рабочих тел магнитокалорических рефрижераторов: Отчет по теме Г-03 / МГТУ. УДК 621.592. Руководитель темы: А.М.Архаров - М., 1989. -54с.
5. Положительное решение от 23.06.88 Магнитокалорический криогенератор / И.А.Архаров, В.И.Крутов, А.А.Жердев и др.
6. Положительное решение от 10.04.89 Способ магнитного охлаждения / И.А.Архаров, В.И.Крутов, А.А.Жердев и др.

И.А.Архаров
10.05.90