

1545 525

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

На правах рукописи

Довбиш Андрей Леонидович

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО
РЕФРИЖЕРАТОРА СТАТИЧЕСКОГО ТИПА
ДЛЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ

05.04.03 – Машины и аппараты холодильной и
криогенной техники и систем кондиционирования

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 1994

Работа выполнена в Балашихинском ордена Ленина научно-производственном объединении криогенного машиностроения имени 40-летия Октября.

- Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Филин Н.В.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Горбачев С.П.
- кандидат технических наук,
с.н.с. Архаров И.А.
- Ведущее предприятие - Российский научный центр
"Курчатовский институт"

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1545525

Исследование м
Довбиш А.П.

Защита диссертации состоится "27" июня 1994 г.
в 13 час. 30 мин. на заседании специализированного Совета
К.053.15.07 в Московском государственном техническом университете
им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская на-
бережная, д. 1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

Ваши отзывы в 2^х экземплярах, заверенные печатью, просьба
высылать по адресу: 107005, г. Москва, 2^я Бауманская ул., д.5

Автореферат разослан "24" мая 1994 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.
Н.Э.Баумана.

Ученый секретарь
специализированного Совета
кандидат технических наук, доцент  Козлов В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С развитием физики высоких энергий, энергетики, электроники, космической техники и технологии все более возрастает потребность в охлаждении при температурах сверхтекучего гелия. Обзор современных информационных источников показывает, что существует потребность в криостатировании сверхтекучим гелием как крупнейших объектов (например, протонный коллайдер ЦЕРН Large Hadron Collider с магнитным полем 10 Тл, масса магнитов 31000 т или ТОКАМАК TORRE 2 SUPRA масса охлаждаемых до 1.8 К магнитов 160 т), так и небольших (например, чувствительные элементы, применяемые в технике связи, военной технике, инфракрасных орбитальных телескопах).

Получение сверхтекучего гелия (He-II) является довольно трудоемкой задачей. Давление насыщенных паров He-II при 1.8 К — 1.66 кПа, поэтому традиционная термомеханическая криогенная гелиевая установка (КГУ) для получения He-II должна иметь в своем составе вакуум-насос, что снижает эффективность и надежность установки, а также увеличивает ее габариты.

В то же время, известен способ охлаждения с использованием магнитокалорического эффекта. Использование магнитного рефрижератора (МР) в составе КГУ позволит создать криогенные системы, не уступающие традиционным по термодинамической эффективности и, в то же время, превосходящие их по надежности и массогабаритным показателям. Особенно эффективно применение МР в спутниках, питаемых от центрального гелиевого окислителя, когда использование сверхтекучего гелия необходимо в отдельных точках охлаждаемого объекта. Магнитные рефрижераторы статического типа (МРСТ) обеспечивают надежность, долговечность, автономность и полную автоматизацию работы.

Цель работы. Разработка физико-математической модели, наиболее полно описывающей реальные процессы в МР; создание экспериментальных образцов, проведение исследований процессов теплообмена и теплопередачи в МР, экспериментальная проверка и корректировка разработанной модели МР; разработка расчетных методик и рекомендаций по проектированию МР.

Научная новизна. На основании экспериментальных и теоретических исследований разработана физико-математическая модель, наиболее полно описывающая работу магнитного рефрижератора от

тического типа (МРСТ) и учитывающая основные потери в цикле МРСТ (потери от неидеального теплообмена рабочего тела с теплоприемником и теплоотдатчиком, потери от ограниченной теплопроводности материала рабочего тела, потери от теплопритока к рабочему телу со стороны жидкого гелия); впервые экспериментально зарегистрировано образование слоя He-II в жидком гелии над рабочим телом МРСТ в процессе размагничивания; показана допустимость применения зависимости по теплоотдаче при кипении, полученной в стационарных условиях, для расчета нестационарных процессов теплоотдачи, происходящих при работе МРСТ; выявлено, что в рабочих режимах конвекция в жидком гелии и наличие на поверхности рабочего малотеплопроводного покрытия незначительно влияет на величину теплопритока от жидкого гелия к рабочему телу МРСТ; установлено, что при значительных размерах рабочего тела потери холодопроизводительности от ограниченной теплопроводности материала рабочего тела МРСТ могут быть существенными, получена зависимость оптимальной толщины рабочего тела МРСТ от режимных параметров цикла, обеспечивающая максимумы эффективности цикла и удельной холодопроизводительности МРСТ.

Практическая значимость. Разработана методика расчета магнитного рефрижератора статического типа для сверхтекучего гелия. Получены зависимости холодопроизводительности и эффективности МРСТ от режимных и конструктивных параметров. Разработаны рекомендации по усовершенствованию МРСТ с целью увеличения эффективности.

Аппробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях, докладывались на Международной конференции по магнитной технологии (MT-12, июль 1991 г, г. Ленинград), на Международной научно-практической конференции "Криогенная техника науке и производству" (сентябрь 1991 г, г. Москва), на Всесоюзном семинаре "Научно-технические проблемы криогенной техники и кондиционирования" (апрель 1991 г, МТУ им. Н.Э.Баумана).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 7 разделов, выводов и приложений, изложенных на 166 с. машинописного текста, включая 48 рисунков, 5 таблиц, приложения и список использованной литературы.

Работа выполнялась в рамках проекта N 90307 Государственной программы "Высокотемпературная сверхпроводимость".

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел. Введение. На основе рассмотренной проблемы создания магнитных рефрижераторов для сверхтекучего гелия сформулированы цели работы. Перечислены основные положения диссертации с указанием научной новизны работы.

Второй раздел. Анализ литературных данных. Постановка задачи. Представлен обзор зарубежных и отечественных данных по проблеме магнитного охлаждения для получения холода при температурах сверхтекучего гелия.

Анализ проработанных информационных источников позволяет сделать следующие выводы:

Большинство ведущих зарубежных фирм США, Японии, Франции активно ведут исследования и разработку магнитных рефрижераторов. Работы в нашей стране и за рубежом по созданию магнитных рефрижераторов находятся в настоящее время на стадии отработки различных концепций и конструктивных решений на небольших экспериментальных макетах. Основные усилия исследователей направлены на температурные диапазоны 1.8 - 4.2 К и 4.2 - 20 К, где преимущества магнитного охлаждения наиболее очевидны.

В температурном диапазоне 1.8 - 4.2 К наиболее перспективным является обратный цикл Карно, как с точки зрения термодинамической эффективности, так и с точки зрения простоты реализации.

Отечественные исследования и зарубежные публикации показывают, что в диапазоне 1.5 - 15 К наиболее широко используется гадолиниево-галлиевый гранат (ГГГ).

По конструктивным решениям магнитные рефрижераторы можно разделить на динамические и статические. Несомненным преимуществом магнитного рефрижератора статического типа (МРСТ) является отсутствие движущихся частей, отсутствие подвижных уплотнений, что определяет высокую надежность и простоту изготовления. При испытаниях МРСТ для сверхтекучего гелия, разработанного исследователями фирмы Hitachi на температурном уровне 1.8 К достигнута удельная объемная холодопроизводительность 6122 Вт/м^2 и КПД $\eta = 0.29$. Относительно низкую эффективность МРСТ авторы об-

ясняют паразитным теплопритоком от жидкого He-I к рабочему телу, обусловленного остаточной конвекцией в жидком гелии. При этом авторы не принимают во внимание возможных потерь, обусловленных эффектами нестационарной теплопроводности в рабочем теле.

Существующие физико-математические модели МРСТ, во-первых, рассматривают рабочее тело МРСТ как сосредоточенную массу, а во-вторых, не имеют достоверного описания механизма теплопритока к рабочему телу.

Учитывая выше изложенное, сформулированы следующие задачи исследования:

- проведение экспериментальных и теоретических исследований процессов теплообмена и теплопередачи в МРСТ и разработка физико-математической модели МРСТ, учитывающей основные составляющие потерь в цикле;
- численное исследование и оптимизация МРСТ по геометрическим и режимным параметрам, разработка мер по снижению потерь в цикле МРСТ;
- разработка экспериментального МРСТ, отработка основных конструктивных решений и режимных параметров цикла;
- разработка рекомендаций по созданию МРСТ.

Третий раздел. Разработка физико-математической модели магнитного рефрижератора статического типа. В разделе выполнен анализ возможных потерь холодопроизводительности магнитного рефрижератора статического типа (МРСТ), выявлены существенные потери, разработана физико-математическая модель МРСТ. Основные составляющие потерь, учитываемые физико-математической моделью МРСТ следующие:

- недорекуперации при теплообмене между рабочим телом и теплоприемником (He-I) или теплоотдатчиком (He-II);
- ограниченная теплопроводность материала рабочего тела МРСТ;
- теплоприток от жидкого гелия к рабочему телу МРСТ в процессе размагничивания.

Основное уравнение математической модели - уравнение теплового баланса для элементарного объема рабочего тела. Учитывая, что рабочее тело МРСТ имеет осесимметричную форму и находится в осесимметричных условиях, уравнение теплового баланса

записывается в цилиндрических координатах:

$$\rho \cdot T \cdot \frac{dS(B, T)}{dT} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

где B, ρ, T, S, λ – величина магнитного поля, плотность, температура, удельная энтропия, коэффициент теплопроводности рабочего тела; r, z – цилиндрические координаты.

Начальное условие

$$T(r, z, 0) = f(r, z) \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_T} = \begin{cases} q_T & \text{при } T \leq T_T \\ -\alpha \cdot (T - T_T) & \text{при } T > T_T \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_X} = \begin{cases} 0 & \text{при } T \geq T_X \\ -h_K \cdot (T^4 - T_X^4) & \text{при } T < T_X \end{cases}$$

где n – нормаль к поверхности контакта рабочего тела с He-I (F_T) или парами с He-II (F_X); q_T – удельный теплоприток к рабочему телу со стороны He-I; h_K – коэффициент фононного теплообмена между рабочим телом и He-II; α – коэффициент теплоотдачи при кипении He-I.

Теплоприток к рабочему телу определяется из решения уравнения нестационарной теплопроводности по столбу жидкого гелия над рабочим телом с учетом образования слоя He-II в жидком гелии при понижении его температуры ниже $T_\lambda = 2.163$ К. При этом принимается, что теплоперенос в слое He-II определяется механизмом взаимного трения нормальной и сверхтекучей компонент Гортера – Меллинка, а на границе раздела фаз He-I – He-II учитывается скачок температуры.

Холодопроизводительность Q_X и теплота, отводимая к He-I Q_T рассчитываются по формулам:

$$Q_X = \frac{1}{\tau_{ц}} \cdot \int_0^{\tau_{ц}} \int_{F_X} \left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_X} \right] dF \cdot d\tau \quad (4)$$

$$Q_T = - \frac{1}{\tau_{ц}} \cdot \int_0^{\tau_{ц}} \int_{F_T} \left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_T} \right] dF \cdot d\tau \quad (5)$$

где $\tau_{\text{ц}}$ - время цикла, $\tau_{\text{ц}} = 1/\nu$.
КПД МРСТ

$$\eta = \frac{Q_x}{Q_T - Q_x} \cdot \frac{T_T - T_x}{T_x} \quad (6)$$

Уравнения (1) - (6) решаются численно, с помощью метода контрольного объема. Разработана методика расчета цикла МРСТ и составляющих потерь холодопроизводительности, создана программа расчета.

Для проверки адекватности предложенной физико-математической модели были использованы данные для МРСТ Hitachi, которые приведены на рис.1 (1 и 2 - экспериментальные данные по холодопроизводительности и эффективности МРСТ, 3 - расчетная кривая). Расчет исследователей фирмы Hitachi дает более, чем в 3 раза завышенный результат по сравнению с экспериментальными данными. Расчет, выполненный с использованием разработанной математической модели (кривые 4 - Q_x и 5 - η), позволил получить удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов (погрешность не превышает 20 %).

Четвертый раздел. Экспериментальное исследование механизма потерь холодопроизводительности МРСТ. В разделе представлены описание экспериментальных образцов, методики проведения экспериментов, приведены экспериментальные результаты и проведен их анализ.

В данном разделе решены следующие задачи:

- экспериментально подтверждена гипотеза об образовании слоя He-II у поверхности рабочего тела со стороны жидкого гелия;
- экспериментально определены зависимости величины градиента температуры в рабочем теле

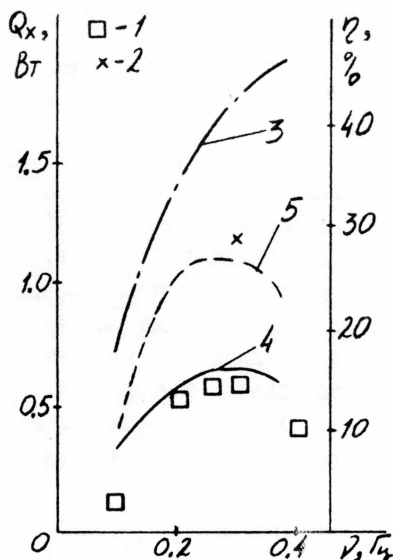


Рис.1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по холодопроизводительности Q_x и КПД η МРСТ.

от режимных параметров:

- определена зависимость теплоотдачи при кипении жидкого гелия на поверхности монокристалла ГТТ в стационарном и в рабочих режимах МРСТ;

- исследовано влияние дополнительного теплового сопротивления (малотеплопроводного покрытия) на поверхности контакта рабочее тело — жидкий гелий, а также конвекции в жидком гелии на величину теплопритока к рабочему телу МРСТ.

Экспериментальные исследования проводились на двух образцах, представляющих собой монокристаллы ГТТ цилиндрической формы и теплоизолированные со стороны боковой поверхности и нижнего торца.

Экспериментальный образец для исследования зависимости величины градиента температуры в рабочем теле МРСТ, а также влияния малотеплопроводного покрытия на величину теплопритока к рабочему телу МРСТ (образец N 1) представляет собой монокристалл ГТТ диаметром 40.2 мм и высотой 30.6 мм. Монокристалл ГТТ теплоизолирован с помощью стакана, выполненного из пенопласта. Температура монокристалла ГТТ измерялась двумя угольными термометрами сопротивления типа "Аллен-Бредли". Верхний термометр (T_B) установлен в радиальном сверлении в монокристалле на расстоянии 5 мм от верхнего торца. Нижний термометр (T_H) установлен на нижнем торце монокристалла.

Экспериментальный образец, предназначенный для подтверждения гипотезы об образовании слоя He-II у поверхности рабочего тела со стороны жидкого гелия, для определения зависимости теплоотдачи при кипении жидкого гелия на поверхности монокристалла ГТТ в стационарном режиме и в рабочих режимах МРСТ, для исследования влияния конвекции в жидком гелии на величину теплопритока к рабочему телу МРСТ (образец N 2) представляет собой монокристалл ГТТ диаметром 21 мм и высотой 21.4 мм в вакуумной изоляции. В монокристалле, в радиальных сверлениях, на расстоянии 5 мм от торцев установлены термометры — T_B и T_H (типа "Аллен-Бредли"). Для устранения конвекции в жидком гелии над открытым торцом монокристалла установлено кольцо из пенопласта, плотно прижатое к образцу. В жидком гелии на расстоянии примерно 0.2 мм от открытого торца монокристалла установлен термометр сопротивления (T_{He}) типа ТК, представляющий собой кристалл

размером 0.5×0.5×1.0 мм.

Образцы размещались в центре импульсного сверхпроводящего соленоида, обеспечивающего магнитное поле в центре до 4.5 Тл.

При определении зависимости теплоотдачи при кипении жидкого гелия на поверхности монокристалла ГТТ на нижнем (теплоизолированном) торце монокристалла был установлен нагреватель.

В результате исследований установлено, что величина критической плотности теплового потока составляет $q_{кр1} \sim 8000 \text{ Вт/м}^2$. Также имеется четко выраженный гистерезис при нарастании и убывании теплового потока.

Полученные экспериментальные результаты с точностью $\pm 20\%$ можно аппроксимировать зависимостями:

$$q = \begin{cases} 2.5 \cdot 10^8 \cdot \Delta T^{1.0} & \text{при } q \leq 3000 \text{ и нарастании} \\ & \text{теплового потока,} \\ 1.82 \cdot 10^4 \cdot \Delta T^{1.4} & \text{при } 3000 < q < 8000, \text{ а также} \\ & \text{убывании теплового потока,} \end{cases} \quad (7)$$

где q – величина теплового потока, Вт/м^2 , ΔT – величина перегрева поверхности ГТТ относительно температуры жидкого гелия.

Моделирование процесса намагничивания монокристалла ГТТ и отвода теплоты намагничивания в режиме кипения с использованием зависимости (7) в математической модели дает хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных по температуре с погрешностью не более 8 %.

При исследовании процесса теплообмена между рабочим телом МРСТ и жидким гелием эксперименты проводились следующим образом. При установлении температуры монокристалла ГТТ равной температуре жидкого гелия ($T \sim 4.2 \text{ К}$), с помощью импульсного СП-магнита осуществлялось намагничивание ГТТ по заданному закону. Выделяющаяся при этом теплота отводилась через открытый торец к жидкому гелию в режиме кипения. При достижении максимального значения магнитного поля $B_{\max}$ и охлаждения ГТТ до исходной температуры (4.2 К) осуществлялось размагничивание ГТТ по заданному закону $B(t)$. В процессах намагничивания и размагничивания регистрировались показания термометров и величина тока в обмотке СП-магнита.

Экспериментально зарегистрировано наличие градиента температуры по высоте монокристалла ГТТ. Расчетная величина гради-

ента температуры по высоте монокристалла ГТТ хорошо согласуется с экспериментальными данными.

На рис. 2а приведены экспериментальные значения изменения температуры ГТТ (образец N 2) и температуры прилегающего к ГТТ слоя жидкого гелия T_{He} при горизонтальной ориентации открытого торца ГТТ и наличии защитного кольца. Видно, что температура прилегающего слоя гелия T_{He} достигает температуры ~ 2.16 К, что подтверждает образование слоя He-II в жидком гелии вблизи поверхности рабочего тела при размагничивании.

На рис. 2б представлены расчетные результаты изменения во времени величины теплопритока к монокристаллу ГТТ, полученные решением обратной задачи теплопроводности с использованием экспериментальных данных $T_B(\tau)$ и $B(\tau)$. Видно, что на начальном этапе размагничивания величина теплопритока от жидкого гелия к ГТТ невелика, однако при образовании слоя He-II теплоприток к ГТТ резко возрастает.

При исследовании влияния конвекции в жидком гелии на величину теплопритока от жидкого гелия к монокристаллу ГТТ в процессе размагничивания установлено, что при скоростях размагничивания, близких к реальным (не менее 1 Тл/с) влияние как естественной, так и остаточной конвекции в жидком гелии на величину теплопритока незначительно. При реальных скоростях размагничивания незначительно также влияние малотеплопроводного покрытия на величину теплопритока. В то же время, малотеплопроводное покрытие на поверхности монокристалла ГТТ ухудшает теплоотдачу от ГТТ к жидкому гелию.

Пятый раздел. Численное исследование и оптимизация магнитного рефрижератора статического типа. В разделе представлены результаты теоретического исследования МРСТ, выполненные с помощью разработанной физико-математической модели.

Проведен анализ потерь в цикле магнитного рефрижератора. Выявлены не учитываемые ранее составляющие потерь холодопроизводительности, обусловленные ограниченной теплопроводностью материала рабочего тела МРСТ. Так при работе МРСТ Hitachi с частотой $\nu = 0.2$ Гц потери от неидеального теплообмена составляют 21 % от холодопроизводительности идеального цикла Карно, потери от ограниченной теплопроводности рабочего тела и потери от теплопритока к рабочему телу со стороны жидкого гелия — по 30 %.

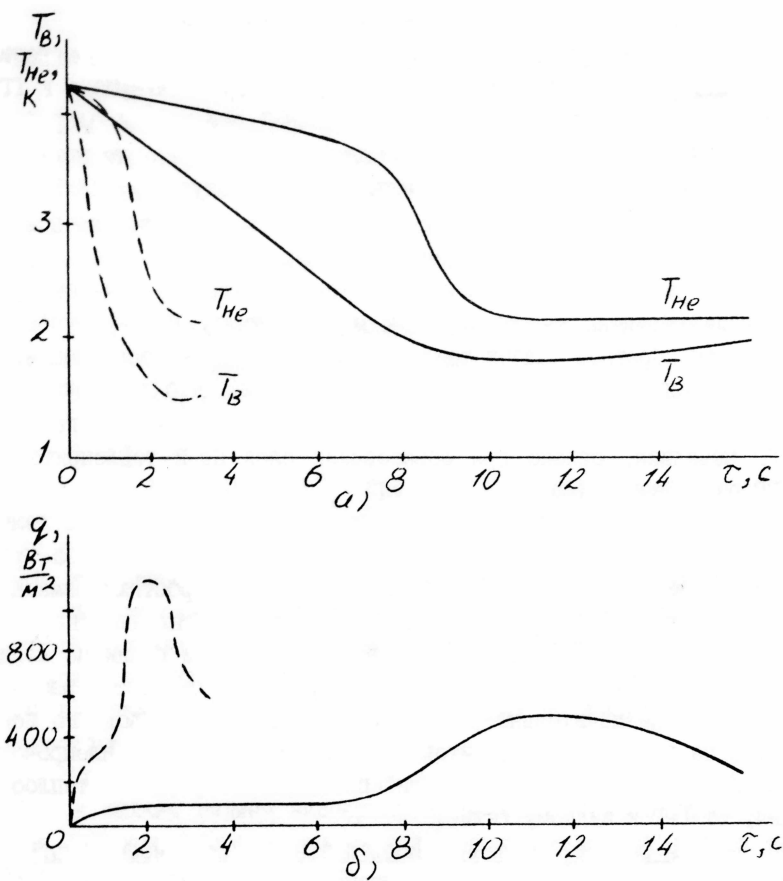


Рис. 2. Экспериментальное изменение температуры монокристалла ГТГ T_B и прилегающего к ГТГ слоя жидкого гелия T_{He} (а), а также расчетные величины теплопритока (б) во времени при размагничивании ГТГ (образец N 2): пунктирные линии - "быстрое" размагничивание; сплошные линии - "медленное" размагничивание.

Выявлено наличие оптимальной толщины рабочего тела МРСТ, соответствующей максимальной удельной объемной холодопроизводительности и эффективности МРСТ. Максимальные значения удельной объемной холодопроизводительности, определенные для оптимальных толщин, увеличиваются с ростом частоты циклов (см. рис. 3) и максимального магнитного поля в цикле и достигают значений 23000 Вт/м^2 (при $\nu = 0.4 \text{ Гц}$ и $B_{\text{max}} = 3.5 \text{ Тл}$). Максимальные значения КПД при этом находятся в диапазоне 29 – 34 %.

Проведено исследование влияния оребрения поверхностей теплообмена рабочего тела на холодопроизводительность МРСТ. Выявлено, что увеличение поверхности верхнего торца рабочего тела, контактирующего с жидким гелием F_T приводит к снижению холодопроизводительности МРСТ, так как хотя это и уменьшает потери от неидеального теплообмена рабочего тела с He-I, однако преобла-

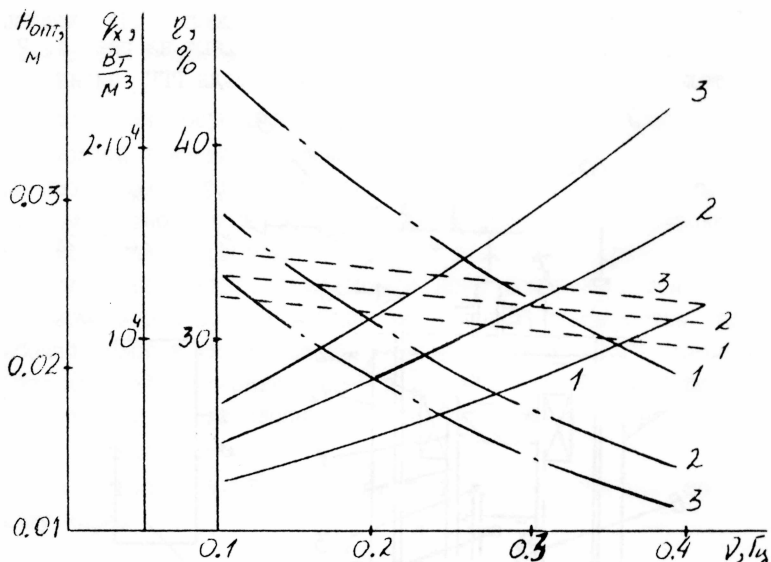


Рис.3. Зависимость оптимальной толщины рабочего тела МРСТ $H_{\text{опт}}$ (— — —), удельной объемной холодопроизводительности МРСТ q_v (————) и КПД МРСТ η (- - -) от частоты циклов ν . 1, 2 и 3 — $B_{\text{max}} = 2.5, 3.0$ и 3.5 Тл соответственно.

дашим является возрастание потерь, обусловленных теплопритоком от жидкого гелия. Увеличение поверхности нижнего торца, контактирующего с парами гелия F_x приводит к росту холодопроизводительности МРСТ. Так, увеличение поверхности F_x в 2 раза приводит к росту холодопроизводительности МРСТ на 12 %. Дальнейшее увеличение поверхности F_x с практической точки зрения нецелесообразно.

Шестой раздел. Экспериментальное исследование магнитного рефрижератора статического типа. Изложены описание стенда и экспериментального МРСТ, методики экспериментов, проанализированы экспериментальные результаты, проведено сопоставление экспериментальных и расчетных результатов.

Основная цель экспериментального исследования — проверка предложенной физико-математической модели в целом, отработка конструктивных решений.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 4. Рабочее тело I, представляющее собой монокристалл ГТТ цилиндричес-

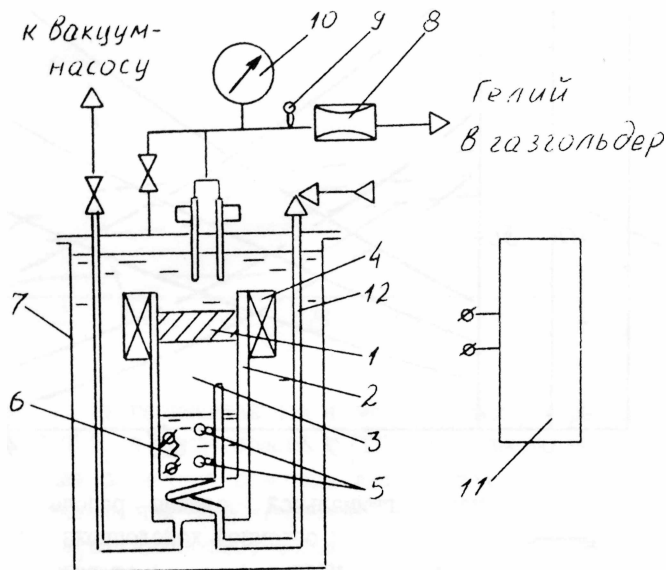


Рис. 4. Схема экспериментального МРСТ

кой формы диаметром $D = 0.04$ м и высотой $H = 0.025$ м, герметично установлено в верхней части теплоизолированного сосуда 2. Верхний торец рабочего тела контактирует с жидким Не-I ($F_T = 1.26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$), нижний торец и часть цилиндрической поверхности - с парами гелия в рабочей полости 3, в которой находится Не-II ($F_X = 2.51 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$). Рабочее тело I находится в отверстии импульсного СП-соленоида 4. В рабочей полости 3 установлены два термометра 5 типа ТПК-17.0 и электронагреватель - имитатор нагрузки 6. Экспериментальный МРСТ смонтирован в криостате КГ-15 (поз. 7). Испарившийся из криостата 7 гелий через газовый счетчик 8 типа ГСБ-400 поступает в газгольдерную линию. Температура и давление гелия на входе в ГСБ-400 измеряются лабораторным термометром ТЛ-15 (9) и образцовым манометром 10 соответственно. СП-соленоид 4 подключен к программируемому источнику питания 11, с помощью которого задается требуемый закон изменения $B(\tau)$. Гелий в рабочую полость 3 поступает через запорную линию 12.

Эксперимент осуществлялся следующим образом. После заполнения рабочей полости 3 жидким гелием в количестве 10^{-4} м^3 с помощью программируемого источника питания 11 задается режим изменения магнитного поля $B(\tau)$. При этом работа МРСТ приводит к понижению температуры гелия в рабочей полости и переводу его в сверхтекучее состояние. Температура Не-II контролируется с помощью термометров 5. При достижении заданной температуры гелия в рабочей полости включался нагреватель 6. Мощность нагревателя, при которой температура Не-II в рабочей полости стабилизируется соответствует холодопроизводительности Q_X на данном температурном уровне T_X .

Эффективность МРСТ η определялась как степень приближения к циклу Карно

$$\eta = \frac{Q_X}{Q_T - Q_X} \cdot \frac{T_T - T_X}{T_X}$$

где Q_T - теплота намагничивания, отводимая от рабочего тела к жидкому гелию в режиме кипения, T_T - температура жидкого Не-I в криостате.

Величина Q_T определялась как разность между количеством теплоты, выделившейся в криостате при работе МРСТ и при работе только СП-магнита (без сосуда поз. 2, см. рис.4). Количество

теплоты, выделившееся в криостате рассчитывалось по количеству испарившегося гелия.

Сопоставление разработанного МРСТ с другими аналогичными конструкциями по удельной объемной холодопроизводительности q_x представлено на рис. 5 (1 – данные для МРСТ Hitachi; 2 – данные для МРСТ НПО Криогенмаш и ИАЭ им И.В.Курчатова; 3 – собственные экспериментальные данные). Сопоставление выполнено при одинаковых температурах теплоприемника и теплоотдатчика и одинаковых величинах максимального магнитного поля в цикле. Видно, что по удельной объемной холодопроизводительности разработанный МРСТ в 1.5 раза превосходит другие аналогичные конструкции. На этом же рис. для разработанного МРСТ представлена расчетная кривая $q_x(\nu)$, полученная с помощью предложенной физико-математической модели. Расхождение расчетных и экспериментальных результатов в рабочем диапазоне частот ($\nu \leq 0.36$ Гц) не превосходит 15 %.

Седьмой раздел. Анализ путей совершенствования и перспектив применения магнитных рефрижераторов статического типа. Проведен анализ и выбраны наиболее перспективные пути усовершенствования МРСТ:

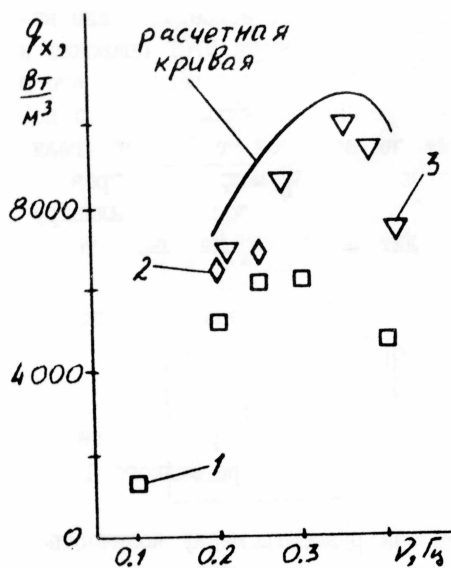


Рис.5. Сравнение разработанного МРСТ с аналогами по удельной объемной холодопроизводительности q_x . $V_{max} = 3$ Тл; $T_T = 4.2$ К; $T_X = 1.8$ К.

- использование защитного насыпного слоя, уменьшающего теплоприток от жидкого гелия к рабочему телу;

- поиск новых веществ, пригодных для использования в качестве рабочих тел МРСТ, имеющих большие значения МК-эффекта и теплопроводности по сравнению с существующими, а также создание спеченных рабочих тел;

- оптимизация режимных параметров работы МРСТ, а также оптимизация по толщине рабочего тела.

Проанализированы перспективы применения МРСТ. Как показал проведенный анализ, уже в настоящее время возможно создание и использование МРСТ в установках для производства сверхтекучего гелия, которые по основным показателям не будут уступать традиционным термомеханическим установкам. Основная область применения установок с МРСТ - установки производительностью - до 50 Вт на температурном уровне 1.8 К или до 40 л/час сверхтекучего гелия, а также небольшие установки, предназначенные для лабораторных исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования магнитного рефрижератора статического типа (МРСТ), разработаны методики расчета и рекомендации по проектированию МРСТ, работающего в температурном диапазоне от 4.2 К до температуры сверхтекучего гелия.

2. Разработана физико-математическая модель МРСТ, наиболее полно описывающая процессы теплообмена и теплопередачи и позволяющая определять количественно основные потери в цикле МРСТ (потери от неидеального теплообмена рабочего тела с теплоприемником и теплоотдатчиком, потери от ограниченной теплопроводности материала рабочего тела, потери от теплопритока к рабочему телу со стороны жидкого гелия).

3. Показано, что при значительных размерах рабочего тела МРСТ потери от ограниченной теплопроводности материала рабочего тела могут быть определяющими. Определена зависимость оптимальной толщины рабочего тела, соответствующей максимальным значениям удельной холодопроизводительности и КПД цикла МРСТ.

4. Показана допустимость применения зависимости по теплоотдаче при кипении, полученной в стационарном режиме, для моде-

лирования нестационарных процессов в магнитном рефрижераторе.

Б. Выполненная оптимизация по режимным и конструктивным параметрам МРСТ позволила повысить его удельную холодопроизводительность в 1.5 раза по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Исследование механизма теплопритока к рабочему телу магнитного рефрижератора статического типа/ Н.В. Филин, И.И. Михайлов, А.Л. Довбиш, И.А. Ковалёв, Н.Ф. Копейкин// Химическое и нефтяное машиностроение. - 1990. - N 8. - С. 17-19.

2. Исследование магнитокалорического рефрижератора/ Н.В. Филин, И.И. Михайлов, А.Л. Довбиш, П.Л. Ронжин// Криогенные процессы и технология. - Балашиха Моск. обл., 1990. - С. 3-14. - (Тр. НИО "Криогенмаш").

3. Математическое моделирование и анализ потерь в статическом магнитном рефрижераторе для сверхтекучего гелия/ Н.В. Филин, И.И. Михайлов, А.Л. Довбиш, П.Л. Ронжин // Проблемы криогенной техники. - Балашиха Моск.обл., 1988. - С. 3-14. - (Тр. НИО "Криогенмаш").

Подписано к печати 18.05. 1994 г.

Формат 60x84/16

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

Заказ N 361.

Ротапринт АО "Криогенмаш"