

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.10>

УДК: 536.241; 537.638.5

МЕХАНИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ КЛЮЧ КРИОГЕННОГО МАГНИТНОГО РЕФРИЖЕРАТОРА

А.В. Маширов¹, К.А. Колесов¹, И.И. Мусабилов²,
Д.Д. Кузнецов¹, В.В. Коледов¹, В.Г. Шавров¹

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

² ИПСМ РАН, 450001, Уфа, ул. Степана Халтурина, 39

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2024 г.

Аннотация. В данной работе исследуются рабочие параметры в криогенном механическом тепловом ключе, который представляет собой разъемную контактную пару из сплава $GdNi_2$ в виде диска и медного цилиндра. Механический тепловой ключ функционирует в вакууме в диапазоне температур 8-325 К при давлении прижатия 250-350 кПа. Исследуется время наступления теплового равновесия при различных пятнах контакта с индиевым термоинтерфейсом и без него при начальной разнице температур образцов 0.8-10 К в диапазоне температур от 8 до 122 К. Было измерено, что при температурном напоре 3 ± 0.14 К в интервале 50...122 К значения температурной релаксации составляет 33.7...39.9 секунд. Уменьшение номинальной площади контакта с 177 мм² до 2.5 мм², увеличивает значения времени температурной релаксации в 1.8 раз, при температуре 73.3 К с 36.6 до 63.5 секунд. Данный температурный интервал соответствует области максимального магнитокалорического эффекта вблизи температуры Кюри сплава $GdNi_2$. На основе экспериментальных данных получены значения количества тепла, которое необходимо отвести для поддержания требуемой температуры объекта охлаждения в криогенном магнитном рефрижераторе.

Ключевые слова: магнитокалорический эффект, магнитное охлаждение.

Финансирование: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 20-79-10197, <https://rscf.ru/project/20-79-10197/>.

Автор для переписки: Маширов Алексей Викторович, a.v.mashirov@mail.ru

Введение

Технология магнитного охлаждения по прогнозам исследователей призвана заменить традиционные методы получения холода не только в быту, но и в области криогенных температур [1]. В основе магнитного охлаждения лежит магнитокалорический эффект – изменение температуры магнетика с магнитным фазовым переходом при адиабатическом намагничивании или размагничивании, являющего своего рода аналогом эффекта дросселирования. Ожидается что применение редкоземельных сплавов с высоким значением магнитокалорического эффекта в криогенных магнитных рефрижераторах, позволит создать холодильные агрегаты по энергетическому совершенству превосходящие широко сейчас применяемые методы получения криогенных температур [2, 3]. На данный момент коммерческие криокуллеры фирм Cryomech и Sumitomo работают на основе гелиевых холодильных циклов Гиффорда Мак Магона или пульсационной трубы. Несмотря на интенсивное исследование магнитокалорических свойств различных сплавов [1, 4, 5], широкого применения и серийного производства криогенных магнитных рефрижераторов нет.

Известны последние работы в данной области. Группа южнокорейских исследователей с 2013 опубликовала цикл работ, посвященный экспериментальному изучению рефрижератору адиабатического размагничивания (ADR – adiabatic demagnetization refrigeration) и рефрижератору с активным магнитным регенератором (AMRR – active magnetic regeneration refrigeration) циклов в криогенной области температур выше ультранизких на основе соленоида высокотемпературного сверхпроводника с высокой частотой

приложения магнитного поля. Рассмотрим их подробнее. Экспериментальный соленоид, выполненный на основе высокотемпературной сверхпроводящей ленты Gd-Ba-Cu-O способен создавать магнитное поле до 3.25 Тл при токе 150 А со скоростью развёртки 0.11 Тл/с (5 А/с) до максимума 2.16 Тл при 100 А [6]. Работает данный соленоид при температуре 17 К, которая поддерживается криокулером цикла Гиффорда-МакМагона (AL230, Cryomech) мощностью 30 Вт при 20 К. Его габариты длина 53.2 мм внешний диаметр 92 мм и внутренний диаметр рабочей шахты 22.2 мм. Затем был создан еще один экспериментальный соленоид, который также был выполнен на основе высокотемпературной сверхпроводящей ленты Gd-Ba-Cu-O и способен создавать магнитное поле до 3.5 Тл при токе 150 А со скоростью развёртки 0.24 Тл/с (10.5 А/с) до максимума 3 Тл при 130 А [7]. Работает данный соленоид также при температуре 17 К, которая поддерживается криокулером цикла Гиффорда-МакМагона (AL230, Cryomech) мощностью 30 Вт при 20 К. Его габариты длина 74 мм внешний диаметр 84.5 мм и внутренний диаметр ширина рабочей шахты 25.4 мм.

Экспериментальное исследование ADR холодильного цикла в работах [7] на основе порошка 600-800 мкм $Dy_{0.9}Gd_{0.1}Ni_2$ описывает следующее. От температурного уровня от 19 до 20 К (горячий теплообменник) на температурный уровень 22-23 К (холодный теплообменник) за время цикла от 85 до 393 секунд возможно достижение холодопроизводительности 5.9 Дж за цикл. Охлаждение реализуется в виде псевдоцикла Карно в диапазоне температур 19-23 К при помощи газового теплового ключа принудительной конвекции, что позволило избежать применения подвижных элементов в конструкции. При различных значениях температурного напора в теплообменниках, а также давления газового теплового ключа были получены различные значения холодопроизводительности [8]. Максимальная холодопроизводительность ADR холодильного цикла при давлении 475 кПа и массовом расходе 0.03 г/с газового теплового ключа составила около 11, 6 и 2 Дж за цикл при температурных напорах в горячем теплообменнике 1, 2 и 3 К, соответственно.

При создании AMR системы данными исследователями также создавался высокотемпературный сверхпроводящий соленоид, были проведены его испытания со скоростью развёртки 20 А/с до максимума 60 А [9]. В результате был создан экспериментальный соленоид, который был выполнен на основе высокотемпературной сверхпроводящей ленты Gd-Ba-Cu-O и способен создавать максимальное магнитное поле до 3 Тл при токе 150 А со скоростью развёртки 1 Тл/с (50 А/с) [10]. Система AMR строилась двухступенчатой на наборе порошков 0.3-0.7 мкм сплавов $GdNi_2$, $Gd_{0.1}Dy_{0.9}Ni_2$, $Dy_{0.85}Er_{0.15}Al_2$, $Dy_{0.5}Er_{0.5}Al_2$, которая работает в температурном диапазоне 20-77 К с максимальной холодопроизводительностью около 0.8 Вт [11, 12], масса рабочих тел указана в более ранней работе около 20 грамм каждый [13]. Один экспериментальный цикл составлял 20 секунд, но энергетические параметры были определены при помощи расчета [14].

Экспериментальным исследованиям AMR систем в криогенной области температур выше ультранизких на основе соленоида низкотемпературного сверхпроводника посвящены работы японских исследователей. Экспериментальный соленоид, выполненный на основе низкотемпературного сверхпроводящей проволоки диаметром 0.5 мм NbTi производителя SuperCon 54S43, способен создавать постоянное магнитное поле до 5.5 Тл. Весь AMR-элемент перемещается в рабочую зону магнита линейным электродвигателем с ходом 200 мм (Intelligent Actuator, Inc., type RCS2-RA13R). Также для достижения на расстоянии 200 мм от центра магнита нулевого магнитного поля используются компенсационные катушки, итоговое магнитное поле в центре соленоида 5 Тл. Работает данный соленоид при температуре около 20 К, которая поддерживается криокулером (Sumitomo Heavy Industries, Ltd type RDK-500B). Габариты основного соленоида длина 162 мм внешний диаметр 184 мм и внутренний диаметр ширина рабочей шахты 130 мм. Система AMR состояла из частиц 0.3-0.5 мм сплава $HoAl_2$ масса рабочего тела 250 грамм в цилиндре внутренний диаметр 34 мм и 100 мм. Система циркуляции гелия для обеспечения работы теплового ключа с расходом примерно 1 грамм в секунду при давлении

около 2 МПа [15]. Был проведен эксперимент по сжижению газообразного водорода, начатый при начальной температуре AMRR-цикла 26 К при давлении около 0,11 МПа с периодом цикла 12 с. После запуска AMRR-цикла температуры на горячем и холодном концах изменяется и образуют разность температур. Впоследствии температура холодного конца становится ниже температуры сжижения водорода. Максимальная охлаждающая способность AMRR-системы, измеренная на нагревателе в зоне ожижения водорода (цилиндр с внутренним диаметром 10 мм и высотой 70 мм), в которой поддерживает постоянный уровень жидкости, в этом исследовании составила около 3 Вт. Предварительные экспериментальные работы [16] подтвердили AMR-эффект с диапазоном температур охлаждением 12 К для 1,8 Тл магнитного поля за 6 секунд на цикл. С помощью моделирования была оценена эффективность установки по сжижению водорода на 10 кг/сут для рабочей температуры от 20 К до 77 К, включая рабочую нагрузку L_{N_2} .

При реализации холодильных циклов в криогенной области температур необходимо применение тепловых ключей: жидкостных, газовых или механических. Их применение довольно специфично. Так, например, использование жидких или газообразных гелия и азота в качестве теплоносителей влечет за собой использование сосудов под давлением и высоким давлением, соответственно. В связи с этим нами были исследованы механические тепловые ключи, которые работают в вакууме и имеют наивысший коэффициент переключения [17].

В данной работе экспериментально изучаются параметры работы криогенного механического теплового ключа, в котором контактную пару составляют магнитокалорическое тело $GdNi_2$ в виде диска и медный теплопринимающий элемент в виде цилиндра. Используется термоинтерфейс в виде фольги индия. Механический тепловой ключ работает в температурном интервале 8-122 К при различных температурных напорах до 10 К между элементами контактной пары. Производится измерение времени переходного процесса – установлении температурного равновесия между элементами

контактной пары. Созданные условия работы механического теплового ключа физически моделируют часть однокаскадного цикла Брайтона криогенного магнитного рефрижератора.

Образцы и методы эксперимента

Эксперимент определения времени достижения термического равновесия строится на основе явления контактной теплопроводности от более нагретого магнитокалорического сплава $GdNi_2$ к менее нагретому медному теплопринимающему цилиндру с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм или без термоинтерфейса в составе контактной пары криогенного механического теплового ключа. Магнитокалорический сплав $GdNi_2$ в форме диска диаметром 15 мм высотой 5 мм массой $m_{GdNi_2} = 7.682$ г в вакуумной камере криостата термостабилизуется при температуре эксперимента $T_1 = T_{GdNi_2}$ таким образом, чтобы его температура T_1 было отлична на фиксированное значение ΔT_{span} от температуры $T_2 = T_{Cu}$ медного теплопринимающего цилиндра диаметром 15 мм высотой 15 мм и массой $m_{Cu} = 19.167$ г. Данные элементы контактной пары в вакууме $10^{-4} \dots 10^{-5}$ мбар находятся в адиабатических условиях первоначально на расстоянии 250 мм после чего линейным электромагнитным двигателем за 2.5 секунды прижимаются с усилием прижатия 250-350 кПа. Происходит регистрация изменения температуры дисков, по данным которой определяется время наступления термического равновесия.

Диск сплава $GdNi_2$ был синтезирован методом аргонно-дуговой плавки на медном водоохлаждаемом поддоне из высокочистых навесок металлов Gd и Ni с тремя переворотами и четырьмя переплавками [18, 19]. Номинальная площадь цилиндрического пятна контакта диаметром 15 мм была равна 177 мм². При помощи шлифовальной бумаги P1000 и P2000 и алмазной пасты 14/10, была проведена предварительная доводка контактирующих поверхностей дисков, а затем произведено так называемое предварительное полирование алмазной пастой 3/2 для получения Ra 0.4 мкм, согласно, литературным данным [20]. Перед экспериментом контактирующая $GdNi_2$ -поверхность обрабатывалась

спиртом и на нее помещалась индиевая фольга толщиной 100 мкм, а медная – обрабатывалась раствором уксусной кислоты, затем в течение 5 минут конструкция вакуумировалась. Измерение температуры осуществлялось датчиками Cernox на внешней стороне $GdNi_2$ -диска контактной пары и средней проточки на медном цилиндре, а также дифференциальными термопарами (один базовый конец возле датчика Cernox, второй измеряемый – приклеен на боковой поверхности ближе к торцу верхнего $GdNi_2$ -диска или в тонком просверленном отверстии медного цилиндра с Arizeon-N в зоне контакта (рис. 1). Дифференциальные термопары подключены к нановольтметру Keithley 2182, так что знак изменений напряжения показывает знак изменения температуры на втором измеряемом конце термопары. Для верхнего $GdNi_2$ -диска использовался датчик CX-1050-SD-НТ X144771, для нижнего медного цилиндра CX-1050-SD-НТ X144783. Датчик Cernox через слой с Arizeon-N плотно клеился на БФ-6, поверхность предварительно была обработана шлифовальной бумагой P1000 и P2000. Однородность магнитного поля 1% в центре магнита составляет 50 мм, т.е. вся контактная пара находится в однородном магнитном поле и смещением показаний термопар при прикладывании внешнего магнитного поля, влиянием магнитного поля на термоэлектрический эффект, можно пренебречь. Крепление дисков осуществляется разъемным ABS-кольцом по угловой или кольцевой проточкам на боковой поверхности.

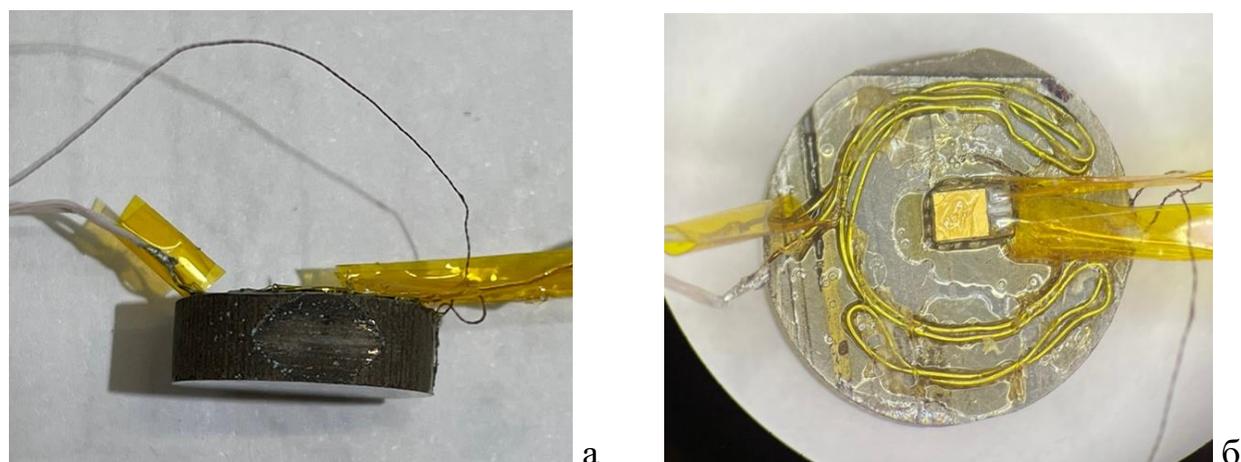


Рис. 1. (а) вид сбоку $GdNi_2$ -диска и крепление измерительных элементов, видна угловая проточка для крепления, (б) вид сверху $GdNi_2$ -диска с измерительными элементами.

В шахту криостата в виде герметичного цилиндра диаметром 29 мм и длиной 765 мм помещается штанга из тонкостенной нержавеющей немагнитной стали с разборной шайбой-держателем из ABS-пластика нижнего медного теплопринимающего цилиндра контактной пары (рис. 2). Верхний $GdNi_2$ -диск прижимается к нижнему медному цилиндру с заданным усилием в вакууме при помощи ABS-штока (рис. 3), который перемещается с точностью до 0,1 мм линейным электродвигателем LinMot со штатной системой управления, усилие регулировалось по показаниям тока на статоре электродвигателя. Таким образом была разработана экспериментальная установка определения времени достижения термического равновесия в диапазоне температур 8-325 К с регулировкой усилия контакта 0-600 кПа в магнитном поле до 10 Тл в среде вакуума или гелия. В состав установки также входит криокуллер SHI Cryogenics RDK-415D, который охлаждает сверхпроводящий соленоид и зеркало шахты криостата (рис. 4). Используется термоконтроллер LakeShore 336, а для измерения сигнала термопар нановольтметр Keithley 2182, которые регистрируют измеряемые данные с частотой не менее 5 Гц (опционно до 20 Гц).

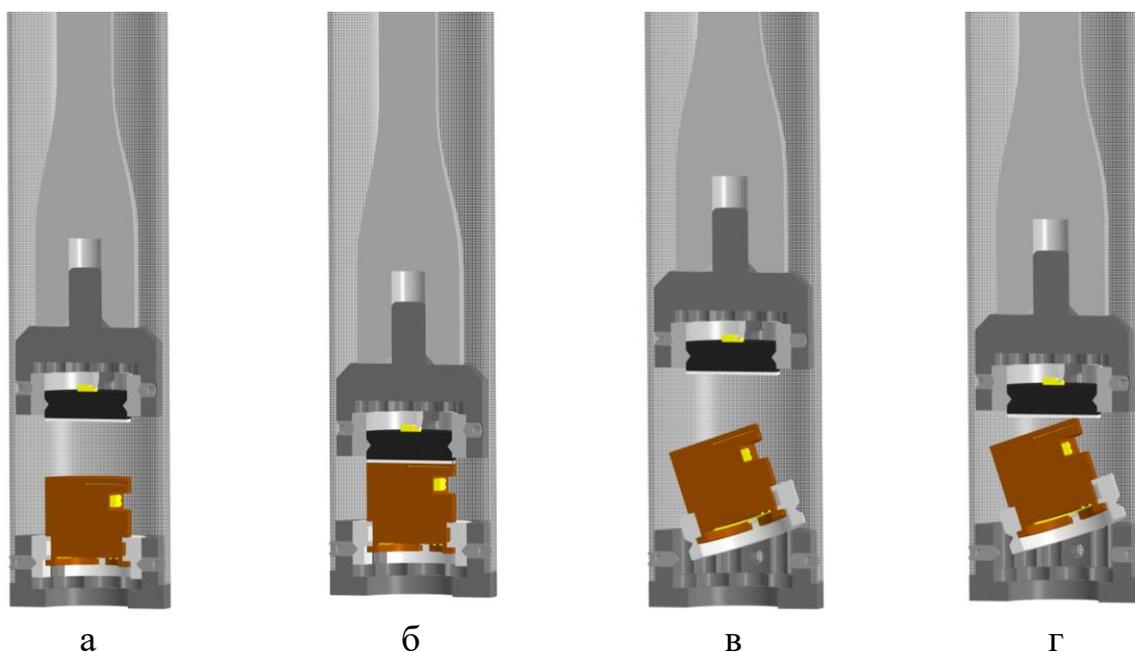


Рис. 2. Крепление ABS-пластика верхнего $GdNi_2$ -диска и нижнего медного теплопринимающего цилиндра контактной пары механического теплового ключа: а – открытое состояние, б – прижатая контактная пара $GdNi_2$ -Cu, в – открытое состояние, медный цилиндр под углом к плоскости контакта, г – закрытое состояние, медный цилиндр под углом к плоскости контакта.

Эксперименты определения времени достижения термодинамического равновесия при контактной теплопроводности от GdNi_2 -диска к медному теплопринимающему цилиндру проводились по следующим протоколам. Первоначально криомагнитная система была захожена криокуллером до $T_1 = T_{\text{GdNi}_2} \approx 6.5 \text{ К}$ и $T_2 = T_{\text{Cu}} \approx 6.5 \text{ К}$ в положении прижатой контактной пары под действием веса конструкции верхнего штока и до рабочей температуры сверхпроводящего соленоида. После чего, шахта с гелием, в которой находится контактная пара, при помощи нагревателя нагревалась до температуры $T_{\text{ш}} \approx 110 \text{ К}$, $T_1 = T_{\text{GdNi}_2} \approx 110 \text{ К}$ и $T_2 = T_{\text{Cu}} \approx 110 \text{ К}$. Далее реализовалась одна из двух нижеприведенных последовательностей.

1) В нулевом магнитном поле контактная пара с индиевым термоинтерфейсом в указанных условиях естественно охлаждалась до требуемых значений, температурный дрейф составлял 1-2 К/мин. Гелий эвакуировался, создавался вакуум около 10^{-4} мбар. Производилась PID-термостабилизация шахты при температуре эксперимента T_1 . После чего верхний GdNi_2 -диск выводился из контакта поднятием на 250 мм вверх (рис. 2а). Нагревателем температура $T_1 = T_{\text{GdNi}_2}$ устанавливалась на $\Delta T_{\text{span}} = 3 \text{ К}$ выше относительно $T_2 = T_{\text{Cu}}$ и за 2.5 секунды производилось опускание GdNi_2 -диска в зону контакта. Тепловой ключ замыкался, контактная пара с индиевым термоинтерфейсом прижималась (рис. 2б). То есть в нижней мертвой точке происходил механический контакт с усилием прижатия 300 кПа и последующее измерение температуры элементов датчиками Сerphox . За измеряемое время релаксации изменение температуры элементов контактной пары прекращалось. Эксперимент повторяли, поместив медный теплопринимающий цилиндр в устойчивое положение под углом к плоскости контакта. Время релаксации, по сути, представляет собой время переходного процесса из нестационарного теплообмена к стационарным условиям, данное время вместе со временем перемещения в зону контакта составляет время срабатывания механического теплового ключа.

2) В нулевом магнитном поле использовался $GdNi_2$ -диск с индиевым термоинтерфейсом и медный теплопринимающий цилиндр, который находился в устойчивом положении под углом к плоскости контакта. Производилась PID-термостабилизация шахты при температуре эксперимента около $T_1 = 75\text{K}$. Гелий эвакуировался, создавался вакуум около 10^{-4} мбар. После чего верхний $GdNi_2$ -диск выводился из контакта поднятием на 250 мм вверх (рис. 2в). Нагревателем устанавливалась разница $T_1 = T_{GdNi_2}$ и $T_2 = T_{Cu}$ равной $\Delta T_{span} = T_1 - T_2 = -10, -5, -3.2, -1.6, -0.8, 0.8, 1.6, 3.2, 5, 10\text{K}$. Производился ввод $GdNi_2$ -диска в магнитное поле за 2.5 секунды. Тепловой ключ замыкался, контактная пара с индиевым термоинтерфейсом прижималась с контактом в виде линии длиной 5 мм и толщиной 0.5 мм (рис. 2г). То есть в нижней мертвой точке происходил механический контакт с усилием прижатия 300 кПа и последующее измерение температуры элементов датчиками Cernox. За измеряемое время релаксации изменение температуры элементов контактной пары прекращалось. Эксперимент повторяли без индиевого термоинтерфейса.

На рис. 5 представлена зависимость выравнивания температур контактной пары $GdNi_2$ -диска ($T_1 = 73.3\text{ K}$) и медного цилиндра ($T_4 = 70.1\text{ K}$) с термоинтерфейсом индиевой фольгой 0.1 мм после включения механического теплового ключа с разницей температур $\Delta T_{span} = 3.2\text{ K}$. Здесь видно, что на 174.5 секунде начался интенсивный теплообмен между элементами контактной пары – это момент прижатия таблеток с усилием 380 кПа по данным линейного электродвигателя. Скорость изменения их температур меняется резко нелинейно и через $174.5 - 96.0 = 78.5$ секунд температура $GdNi_2$ -диска опустилась на $\Delta T_1 = 1.64\text{ K}$, а температура нижнего – поднялась на $\Delta T_4 = 0.50\text{ K}$. В тоже время если проследить показания ΔT_1 и ΔT_4 , то их интенсивное изменение по времени заканчивается в какой-то точке, после чего наступает стадия неинтенсивного теплообмена (хвост). Для обработки экспериментальных результатов и нахождения времени температурной релаксации будем применять экстраполяцию. Тогда время температурной релаксации при соединении

контактной пары GdNi₂-диска и медного цилиндра с термоинтерфейсом индиевой фольгой 0.1 мм с начальным температурным напором $\Delta T_{\text{span}} = T_1 - T_4 = 3.2$ К при $T_1 = 73.3$ К равно $T_{\text{relax}} = 36.6$ с. На начальном этапе перед прижатием элементов контактной пары квазилинейном участке температурный дрейф верхнего -0.07 К/мин и нижнего -0.09 К/мин, после контакта образцов температурный дрейф контактной пары -0.13 К/мин. Можно сказать, что теплопритоками можно пренебречь. После 88 секунды остается постоянный температурный напор между датчиками «Сернох» $\Delta T_{1-4} = 1$ К из-за контактного термосопротивления. Можно заключить, что путем контактной теплопроводности за конечное время 36.6 секунды от верхнего GdNi₂-диска путем контактной теплопроводности с термоинтерфейсом индиевой фольгой 0.1 мм было отведено количество тепла равное $Q_{\text{GdNi}_2} = c_{\text{pGdNi}_2} m \Delta T_1 = 2.75$ Дж, а нижней передано $Q_{\text{Cu}} = 1.78$ Дж. Разница значений может быть объяснена тем, что теплоемкость меди является функцией температуры, использованием справочных данных теплоемкостей и наличием тепловой связи образцов с конструкцией держателей, но главным образом из-за наличия контактного термосопротивления. За время $T_{\text{relax}} = 36.6$ секунд при охлаждении и нагревании путем контактной теплопроводности, можно передать теплоту равную значению около 2.75 Дж.

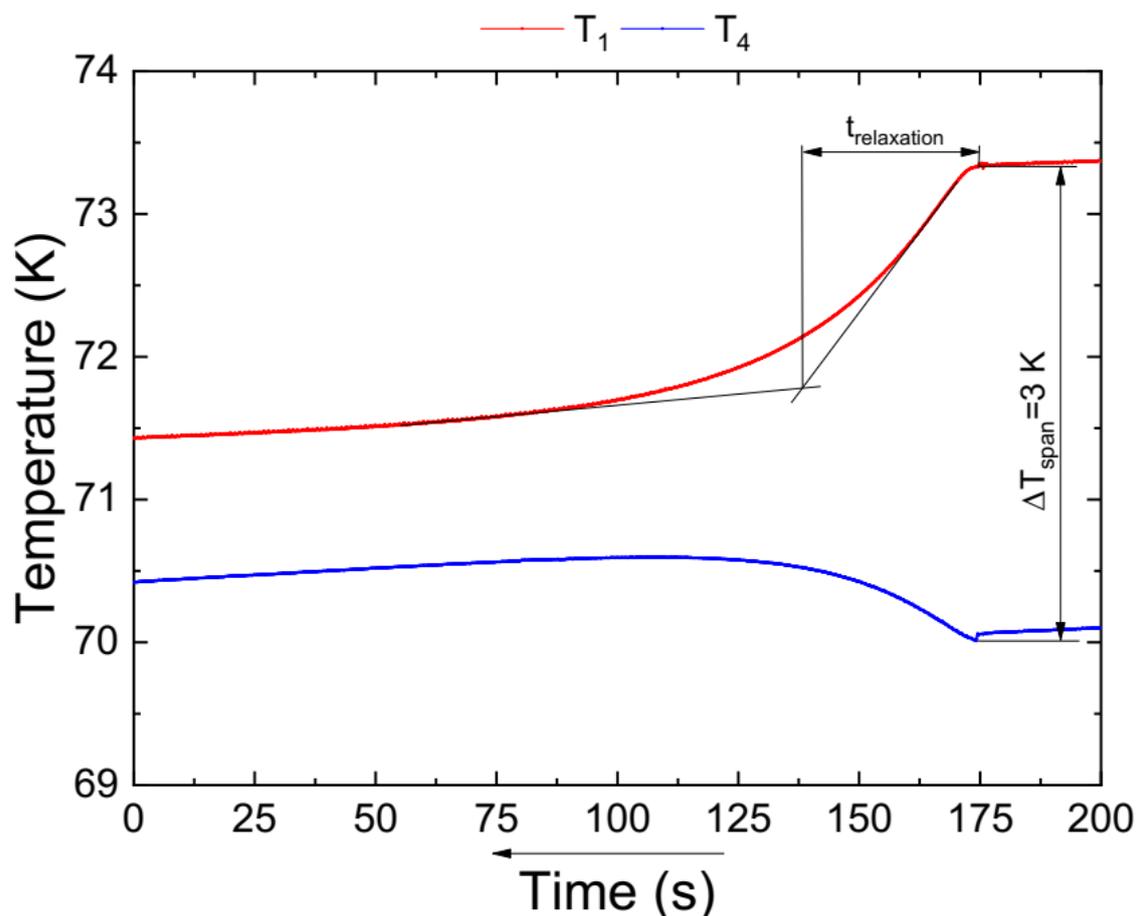


Рис. 5. Экспериментальная зависимость выравнивания температур контактной пары GdNi₂-диска и медного цилиндра с термоинтерфейсом индиевой фольгой 0.1 мм после включения механического теплового ключа с разницей температур $\Delta T_{\text{span}} = 3.2$ K, когда начальная температура верхнего GdNi₂-диска по датчику Cernox T1 = 73.3 K и температура нижнего стержня по датчику Cernox T4 = 70.1 K.

Обсуждение результатов

На рисунке 6 представлены значения времени температурной релаксации, наступления термического равновесия, в зависимости от начальной температуры верхнего GdNi₂-диска при начальном температурном напоре $\Delta T_{\text{span}} = 3 \pm 0.14$ K. Данные приведены для двух вышеописанных экспериментов: значения синих заполненных звёзд получены для контактной пары GdNi₂-диска и медного теплопринимающего цилиндра с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм с контактом в виде круга площадью 177 мм² с усилием прижатия 250-350 кПа; значения синих полых звёзд получены для контактной пары GdNi₂-диска и медного теплопринимающего цилиндра с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм

с контактом в виде линии длиной 5 мм и толщиной 0.5 мм с усилием прижатия 250-350 кПа.

Первая зависимость является нелинейной, в интервале температур 8-20 К практически не зависит от температурного напора и составляет 2.5 до 3.5 секунд при $\Delta T_{\text{span}} = 3 \dots 7.46$ К. Затем при $\Delta T_{\text{span}} = 3 \pm 0.14$ К в интервале температур 20...50 К происходит увеличение значений на один порядок. От 50 до 122 К значения температурной релаксации изменяется незначительно и составляет 33.7...39.9 секунд. В целом поведение данной зависимости качественно хорошо сходится с теплоемкостью сплава GdNi_2 [21], которая в 3-4 раза выше теплоёмкости меди [22]. Для сравнения при экспериментальном исследовании времени температурной релаксации контактной пары двух медных цилиндра с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм с контактом в виде круга площадью 177 мм² с усилием прижатия 250-350 кПа при температуре $T_1 = 12,5\text{K}$ время температурной релаксации составляет от 0.8-1 секунды и линейно возрастает до 120К [23], где достигает 16 секунд, что в два-три раза быстрее чем в данной работе.

Зависимость для контакта в виде линии при $\Delta T_{\text{span}} = 3 \pm 0.11$ в интервале температур 26...63 К увеличивается в интервале 27...64 секунд, потом наблюдается скачек до 57 секунд при 81 К и плавное возрастание 66 сек при 118 К. Здесь более явное качественное соотношение с теплоемкостью сплава GdNi_2 , которая испытывает скачек при температуре Кюри равной 75 К.

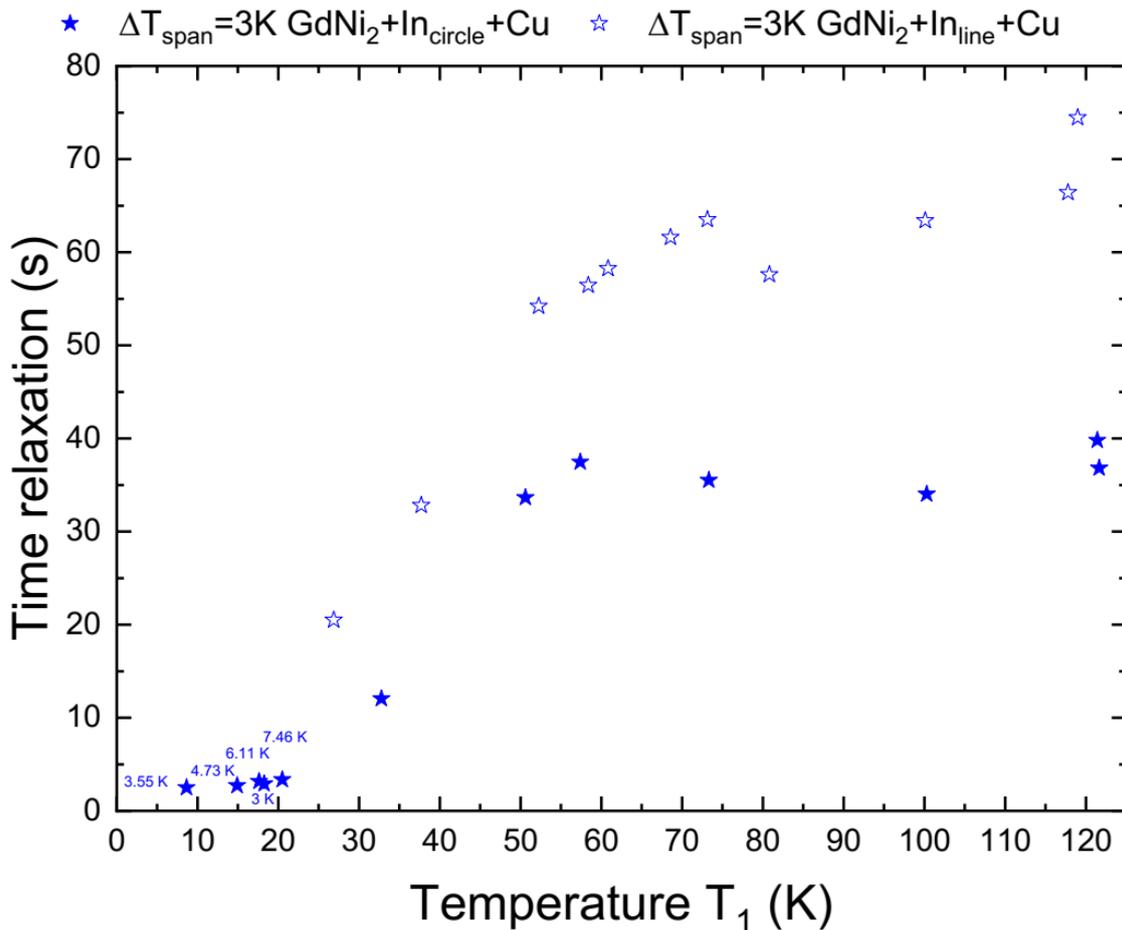


Рис. 6. Значения времени температурной релаксации в зависимости от начальной температуры T_1 верхнего GdNi_2 -диска в составе контактной пары с медным теплопринимающим цилиндром с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм при начальном температурном напоре $\Delta T_{\text{span}} = 3$ К с усилием прижатия 250-350 кПа: синие заполненные звёзды для контакта в виде круга площадью 176.7 мм²; синие полые звёзды для контакта в виде линии длиной 5 мм и толщиной 0.5 мм.

На рисунке 7 представлены значения времени температурной релаксации, наступления термического равновесия, в зависимости от начального температурного напора $\Delta T_{\text{span}} = -10, -5, -3.2, -1.6, -0.8, 0.8, 1.6, 3.2, 5, 10$ К при начальной температуры верхнего GdNi_2 -диска $T_1 = 75$ К. Значения синих полых звёзд получены для контактной пары GdNi_2 -диска и медного теплопринимающего цилиндра с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм с контактом в виде линии длиной 5 мм и толщиной 0.5 мм с усилием прижатия 250-350 кПа. Тоже без индиевого термоинтерфейса показано зелеными квадратами.

Для сплава фазы Лавеса $GdNi_2$, согласно [4, 5, 24] в магнитном поле 5 Тл при температуре 75 К, адиабатическое изменение температуры составляет $\Delta T_{ад}$ около 3 К. В вышеописанных условиях при отношении номинальной площади контакта к массе $GdNi_2$ равном $23 \text{ мм}^2/\text{г}$ количество тепла, выделяемое через индиевый термоинтерфейс механического теплового ключа равно $Q_{GdNi_2} = 2.75 \text{ Дж}$. В данном температурном диапазоне время до установления теплового равновесия составляет 36.6 секунд. Удельный тепловой поток составляет $425 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Тогда за один холодильный цикл Брайтона с рабочим телом $GdNi_2$ в указанных массогабаритных параметрах номинальная холодопроизводительность может составить 2.75 Дж за цикл охлаждения 78.2 секунды или 35 мВт. Сравнивая данный результат с результатами, можно прийти к выводу, для того чтобы поддерживать мощность охлаждения медного объекта охлаждения величиной 48 Вт при температуре 75 К, как в коммерческом агрегате охлаждения криокуллере фирмы Cryomech [25] потребуется масса $GdNi_2 = 10535 \text{ г}$ или произвести 18 циклов.

Проведенный эксперимент является модельным для дальнейшего изучения контактной теплопроводности пары $GdNi_2$ -Cu и термоинтерфейсов и уточнения количества передаваемого тепла. Полученные значения времени температурной релаксации, за исключением времени перемещения подвижного образца контактной пары (1,5 с) можно сравнить с известными данными из представленных работ. Так, например, в газовом тепловом ключе в работе [26] время включения больше полученного в нашей работе на несколько порядков. В работе [27] также для газового теплового ключа время включения составляет несколько минут. В работе [28] максимальное время порядка нескольких минут.

Заключение

В работе показано, что при температурном напоре $\Delta T_{span} = 3 \pm 0.14 \text{ К}$ для контактной пары $GdNi_2$ -диска и медного цилиндра применение индиевой фольги толщиной 100 мкм в качестве термоинтерфейса с усилием прижатия 250-350 кПа в интервале 50...122 К значения температурной релаксации

составляет 33.7...39.9 секунд. Данный температурный интервал соответствует области максимального магнитокалорического эффекта вблизи температуры Кюри сплава $GdNi_2$. С уменьшением температуры эксперимента до 8 К значения температурной релаксации нелинейно снижается до 2,5 секунд. Однако уменьшение номинальной площади контакта с 177 мм² до 2.5 мм², увеличивает значения времени температурной релаксации в 1.8 раз, при температуре 73.3 К с 36.6 до 63.5 секунд. Качественно, зависимость времени температурной релаксации в зависимости от начальной температуры T_1 верхнего $GdNi_2$ -диска в составе контактной пары с медным теплопринимающим цилиндром с индиевым термоинтерфейсом 100 мкм при начальном температурном напоре $\Delta T_{span} = 3$ К с усилием прижатия 250-350 кПа, соотносится, с температурной зависимостью теплоемкости сплава $GdNi_2$.

При использовании сплава $GdNi_2$ в качестве рабочего тела криогенного магнитного рефрижератора, работающему по циклу Брайтона на температурном уровне 70-73 К, с механическим тепловым ключом и отношением номинальной площади контакта к массе рабочего тела равным 23 мм²/г возможно достижение холодопроизводительности 35 мВт.

Финансирование: Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, проект № 20-79-10197, <https://rscf.ru/project/20-79-10197/>.

Литература

1. Franco V. et al. Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices //Progress in Materials Science. – 2018. – Т. 93. – С. 112–232.
2. Kitanovski A. et al. The thermodynamics of magnetocaloric energy conversion // Magnetocaloric Energy Conversion: From Theory to Applications. – 2015. – С. 1–21.
3. Kitanovski A. Energy applications of magnetocaloric materials // Advanced Energy Materials. – 2020. – Т. 10. – №. 10. – С. 1903741.

4. Liu W. et al. A study on rare–earth Laves phases for magnetocaloric liquefaction of hydrogen // *Applied Materials Today*. – 2022. – Т. 29. – С. 101624.
5. Liu W. et al. Designing magnetocaloric materials for hydrogen liquefaction with light rare–earth Laves phases // *Journal of Physics: Energy*. – 2023. – Т. 5. – №. 3. – С. 034001.
6. Park J., Jeong S., Kim S. AC Operation of Gd–Ba–Cu–O High TC Superconducting Magnet for Magnetic Refrigeration // *IEEE transactions on applied superconductivity*. – 2013. – Т. 24. – №. 3. – С. 1–4.
7. Park J., Park I., Jeong S., Kim S. Experimental Investigation on Conduction–Cooled Fast–Ramping Layer–Wound (RE)BCO Superconducting Magnet for Magnetic Refrigeration // *IEEE transactions on applied superconductivity*. – 2015. – Т. 25. – №. 3. – С. 1–5.
8. Park J., Jeong S., Park I. Development and parametric study of the convection-type stationary adiabatic demagnetization refrigerator (ADR) for hydrogen re-condensation // *Cryogenics*. – 2015. – Т. 71. – С. 82–89.
9. Park I. et al. Ramping operation of the conduction–cooled high–temperature superconducting magnet for an active magnetic regenerator system // *IEEE Transactions on applied superconductivity*. – 2016. – Т. 26. – №. 4. – С. 1–5.
10. Park I. et al. Performance of the fast–ramping high temperature superconducting magnet system for an active magnetic regenerator // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2017. – Т. 27. – №. 4. – С. 1–5.
11. Park I., Jeong S. Development of the active magnetic regenerative refrigerator operating between 77 K and 20 K with the conduction cooled high temperature superconducting magnet // *Cryogenics*. – 2017. – Т. 88. – С. 106–115.
12. Park I. et al. Design method of the layered active magnetic regenerator (AMR) for hydrogen liquefaction by numerical simulation // *Cryogenics*. – 2015. – Т. 70. – С. 57–64.
13. Kim Y., Park I., Jeong S. Experimental investigation of two–stage active magnetic regenerative refrigerator operating between 77 K and 20 K // *Cryogenics*. – 2013. – Т. 57. – С. 113–121.

14. Park I. et al. Performance analysis of the active magnetic regenerative refrigerator for 20 K. // Proceedings of the 19th International Cryocooler Conference. – June 20–23. – 2016. – С. 495.
15. Kamiya K. et al. Active magnetic regenerative refrigeration using superconducting solenoid for hydrogen liquefaction // Applied Physics Express. – 2022. – Т. 15. – №. 5. – С. 053001.
16. Numazawa T. et al. Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction // Cryogenics. – 2014. – Т. 62. – С. 185–192.
17. Klinar K. et al. Fluidic and mechanical thermal control devices // Advanced electronic materials. – 2021. – Т. 7. – №. 3. – С. 2000623.
18. Anikin M. et al. Magnetic and magnetocaloric properties of $Gd(Ni_{1-x}Fe_x)_2$ quasi-binary Laves phases with $x=0.04\div 0.16$ // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Т. 449. – С. 353–359.
19. Mashirov A. V. et al. Homogenization annealing and magnetic properties of a sample of the Laves phase $GdNi_2$ // Fizika Tverdogo Tela. – 2021. – Т. 63. – №. 12. – С. 1994–1999.
20. Dhuley R. C. Pressed copper and gold-plated copper contacts at low temperatures—A review of thermal contact resistance // Cryogenics. – 2019. – Т. 101. – С. 111–124.
21. Baranov N. V. et al. Enhanced magnetic entropy in $GdNi_2$ // Physical Review B. – 2007. – Т. 75. – №. 9. – С. 092402.
22. Stevens R., Boerio-Goates J. Heat capacity of copper on the ITS–90 temperature scale using adiabatic calorimetry // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2004. – Т. 36. – №. 10. – С. 857–863.
23. Kolesov K. . et al. Parameters of the Cryogenic Mechanical Thermal Switch with Temperature Range 15–120 K for Magnetic Refrigerators // Unpublished results. – 2024.
24. Taskaev S. et al. Magnetocaloric effect in $GdNi_2$ for cryogenic gas liquefaction studied in magnetic fields up to 50 T // Journal of applied physics. – 2020. – Т. 127. – №. 23.

25. Cryomech. (19 04 2023 г.). Cryomech. Получено из Cryomech:
<https://www.cryomech.com/cryocoolers/gifford-mcmahon-cryocoolers/>
26. Marland B., Bugby D., Stouffer C. Development and testing of advanced cryogenic thermal switch concepts // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2000. – Т. 504. – №. 1. – С. 837–846.
27. Dermenakis S. Thermal characterization of a gas-gap heat switch for satellite thermal control // Master Thesis, Delft University of Technology. – 2016.
28. Jahromi A. E., Sullivan D. F. A piezoelectric cryogenic heat switch // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Т. 85. – №. 6.

Для цитирования:

Маширов А.В, Колесов К.А., Мусабилов И.И., Кузнецов Д.Д., Шавров В.Г. Механический тепловой ключ криогенного магнитного рефрижератора. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.10>